

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra Elektroenergetiky**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vliv slunečních elektráren na elektrizační soustavu  
Solar Power Plants Influence of the Power Grid

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Tomáš Nieslaník**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Vliv slunečních elektráren na elektrizační soustavu  
Solar Power Plants Influence of the Power Grid

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor provozu fotovoltaických elektráren
2. Vliv slunečních elektráren na ovlivnění provozu distribučních sítí
3. Variantní řešení podpůrných služeb pro omezení negativních vlivů slunečních elektráren na elektrizační soustavu
4. Analýza měření činného výkonu vytypované fotovoltaické elektrárny

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení
2. Spolehlivost, bezpečnost a kvalita dodávky elektrické energie, EGU Praha, E2010
3. Sborník referátů EPE 2010 - VUT Brno
4. Sborník referátů EPE 2011 - VŠB Dlouhé Stráně
5. Janíček, F.: Renewable energy sources 2, STU - Bratislava 2010

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

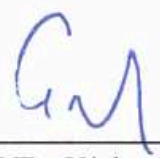
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Zdeněk Hradílek, DrSc.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení Studenta:**

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 3.5.2012

Podpis.....

### **Poděkování:**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Zdeňku Hradílkovi, DrSc. a konzultantovi Ing. Tomáši Šumberovi za odbornou pomoc, připomínky a cenné rady při zpracovávání diplomové práce.

## **Abstrakt:**

Tato diplomová práce se zabývá vlivem fotovoltaických elektráren na elektrizační soustavu, z hlediska stability dodávky dodávaného výkonu. Jednotlivé kapitoly jsou vytvořeny pro postupnou analýzu dané problematiky. Zabývá se problematikou fotovoltaických elektráren, jejich konstrukcí a připojením k elektrizační soustavě. Informuje o vlivu slunečních elektráren na elektrizační soustavu se zaměřením na dodávku činného výkonu, a dalších vlivů, které provoz fotovoltaické elektrárny způsobují. Jedná se o zpětný tok výkonů a snižování tvrdosti sítě. Tato diplomová práce dále rozebírá problematiku vlivu fotovoltaických elektráren na potřebu podpůrných služeb a navrhuje možnosti pro jejich snížení. V praktické části je provedena analýza měření činného výkonu fotovoltaické elektrárny, zaměřená na dodávku výkonu, koeficient využití, histogram četnosti výkonu, vliv fotovoltaické elektrárny na denní diagram zatížení a problematiku dynamiky variability činného výkonu.

## **Abstract:**

This thesis focuses on the influence of photovoltaic power plants in the electricity grid, in terms of stability of the supplied power supply. Individual chapters describe progressive analysis of the issue. The thesis deals with issues of photovoltaic power plants, structures and their connection to the electricity grid. It informs about the influence of solar power to electricity system with a focus on active power supply, and other factors that cause the photovoltaic operation. This is a reverse flow of power and reduce the hardness of the network. This thesis also analyzes the impact of photovoltaic power plants in need of support services and proposes options for their reduction. The practical part of the thesis focuses on the analysis of active power measurements of photovoltaic power plants, designed to supply power, coefficient of utilization, the frequency histogram of power, photovoltaic effect on the daily chart and the issue of dynamic load variation of active power.

## **Klíčová slova:**

Fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, fotovoltaická elektrárna, podpůrné služby, činný výkon, koeficient využití, denní diagram zatížení, dynamika variability činného výkonu, zpětný tok výkonu.

## **Keywords**

Photovoltaic cell, photovoltaic panels, solar power, support services, active power, coefficient of utilization, daily load diagram, dynamic variation of active power, reverse power flow.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

ČEPS	Česká energetická přenosová soustava
ČR	Česká republika
ČSRES	České sdružení regulovaných elektroenergetických společností
DDZ	Denní diagram zatížení
DS	Distribuční soustava
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
ERU	Energetický regulační úřad
ES	Elektrizační soustava
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
KPS	Kodex přenosové soustavy
Obr.	Obrázek
OZE	Obnovitelné zdroje
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PS	Přenosová soustava
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
Tab.	Tabulka

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ROZBOR PROVOZU FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN.....</b>	<b>3</b>
2.1	SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ.....	3
2.2	HISTORICKÝ VÝVOJ .....	4
2.3	PRINCIP ČINNOSTI FOTOVOLTAIKY .....	4
2.4	ROZDĚLENÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKU .....	5
2.5	FV PANELY .....	6
2.6	ZTRÁTY ENERGIE VE FOTOVOLTAICKÉM ČLÁNKU .....	7
2.6.1	<i>V důsledku přeměny energie.....</i>	<i>7</i>
2.6.2	<i>Důsledek stárnutí fotovoltaických panelů.....</i>	<i>7</i>
2.7	FV ELEKTRÁRNY .....	8
2.7.1	<i>Typy fotovoltaických systémů.....</i>	<i>8</i>
2.7.2	<i>Rozdělení FV elektráren:.....</i>	<i>10</i>
2.8	FOTOVOLTAIKA V MEZINÁRODNÍM POHLEDU .....	10
2.9	SLUNEČNÍ ENERGETIKA V ČR.....	11
2.9.1	<i>Současný stav FVE v ČR.....</i>	<i>11</i>
2.9.2	<i>Lokality v ČR, vhodné k další výstavbě.....</i>	<i>12</i>
<b>3</b>	<b>VLIV SLUNEČNÍCH ELEKTRÁREN NA OVLIVNĚNÍ PROVOZU DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ. ....</b>	<b>14</b>
3.1	ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA .....	14
3.2	ANALÝZA DODÁVEK ELEKTRICKÉ ENERGIE ZE SLUNEČNÍCH ELEKTRÁREN .....	14
3.2.1	<i>Intenzita slunečního záření.....</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>Výkon dodávaný elektrárnou .....</i>	<i>15</i>
3.2.3	<i>Výkonová křivka fotovoltaické elektrárny.....</i>	<i>17</i>
3.2.4	<i>PQ diagram .....</i>	<i>17</i>
3.2.5	<i>Koeficient využití .....</i>	<i>18</i>
3.2.6	<i>Dynamika variability činného výkonu .....</i>	<i>19</i>
3.3	ZPĚTNÝ TOK VÝKONU V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH .....	20
3.4	ZTRÁTY PŘI PŘENOSU .....	21
3.5	SNÍŽENÍ ZKRATOVÉHO VÝKONU SÍTĚ .....	21
3.6	OMEZENÍ VLIVŮ FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN NA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVU .....	21
3.6.1	<i>Vybrané meze z kodexu přenosové soustavy.....</i>	<i>22</i>
3.6.2	<i>Dispečerské řízení.....</i>	<i>22</i>
<b>4</b>	<b>VARIANTNÍ ŘEŠENÍ PODPŮRNÝCH SLUŽEB PRO OMEZENÍ NEGATIVNÍCH VLIVŮ SLUNEČNÍCH ELEKTRÁREN NA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVU .....</b>	<b>23</b>
4.1	STABILITA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY .....	23
4.2	PROSTŘEDKY PRO ZAJIŠTĚNÍ STABILITY ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY .....	25
4.2.1	<i>Primární regulace frekvence bloku.....</i>	<i>25</i>
4.2.2	<i>Sekundární regulace výkonu bloku.....</i>	<i>26</i>
4.2.3	<i>Terciární regulace .....</i>	<i>27</i>
4.3	POŽADOVANÁ VÝŠE PODPŮRNÝCH SLUŽEB V RÁMCI ČR .....	27
4.3.1	<i>Požadovaná výše primární regulační rezervy.....</i>	<i>27</i>
4.3.2	<i>Požadovaná výše sekundární regulační rezervy.....</i>	<i>28</i>

4.3.3	Požadovaná výše terciální regulační rezervy .....	28
4.4	PROSTŘEDKY PRO OMEZENÍ NÁROKŮ NA PODPŮRNÉ SLUŽBY POTŘEBNÉ PRO PROVOZ FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN.....	28
4.4.1	Predikce výroby elektrické energie z fotovoltaických elektráren.....	29
4.4.2	Soudobost fotovoltaických elektráren v rámci České republiky.....	30
4.4.3	Spolupráce fotovoltaických a větrných elektráren.....	31
4.4.4	Řízení spotřeby elektrické energie podle její výroby.....	32
4.5	AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	33
<b>5</b>	<b>ANALÝZA MĚŘENÍ ČINNÉHO VÝKONU VYTYPOVANÉ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY .....</b>	<b>36</b>
5.1	POPIS ANALYZOVANÉ ELEKTRÁRNY .....	36
5.1.1	Měnič KACO 3000xi.....	37
5.1.2	Připojení elektrárny k distribuční síti.....	37
5.1.3	Hodnocení lokality.....	38
5.2	ROČNÍ ZÁVISLOST.....	39
5.2.1	Dodávaný okamžitý činný výkon.....	39
5.2.2	Koeficient využití .....	40
5.2.3	Histogram četnosti dodávaného okamžitého činného výkonu .....	41
5.3	MĚSÍČNÍ ZÁVISLOST.....	42
5.3.1	Dodávaný okamžitý činný výkon.....	42
5.3.2	Koeficient využití .....	45
5.3.3	Histogram četnosti dodávaného výkonu .....	47
5.3.4	Analýza kolísání činného a jalového výkonu .....	49
5.4	DENNÍ ZÁVISLOST.....	50
5.4.1	Dodávaný okamžitý činný výkon.....	50
5.5	VLIV FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY NA DENNÍ DIAGRAM ZATÍŽENÍ.....	53
5.5.1	Srovnání činných výkonů na rozvodně a FVE ve sledovaném období .....	53
5.5.2	Inverzní tok činného výkonu .....	56
5.5.3	Srovnání jalových výkonů na rozvodně a FVE ve sledovaném období.....	58
5.5.4	Podrobnější analýza denního diagramu zatížení.....	58
5.6	DYNAMIKA VARIABILITY ČINNÉHO VÝKONU .....	59
5.7	SROVNÁNÍ ČERVENEC 2010 – ČERVENEC 2011 .....	62
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>68</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>69</b>

# 1 Úvod

Většina spotřeby elektrické energie je v současnosti kryta ze zdrojů spalujících fosilní paliva. Jejich zásoby se ovšem stále zmenšují, proto je nutné minimalizovat výrobu elektrické energie z těchto zdrojů a zaměřit se daleko více na zdroje obnovitelné. Obnovitelné zdroje jsou nevyčerpatelné zdroje elektrické energie. Za obnovitelné zdroje se považuje energie sluneční a z jejího působení odvozenou energii větrnou, vodní, rostlinnou a geotermální. Roční potenciál obnovitelných zdrojů je odhadován na 6,7 TW<sub>r</sub> [6]. Proto je nutné pokusit se ho využívat co nejlépe. Další obrovskou výhodou obnovitelných zdrojů je, že neznečišťují životní prostředí.

Využívání obnovitelných zdrojů v maximální míře je jeden z bodů energetické politiky EU. Česká republika se v přístupové dohodě z Atén (z roku 2003) zavázala, že v roce 2010 dosáhne podíl výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů osm procent, a do roku 2020 obnovitelné zdroje pokryjí 13,5 % spotřeby elektřiny. Pro rozšíření obnovitelných zdrojů byla v České republice zavedena politika vysokých výkupních cen, nastavených vysoko a v nepoměru k výkupním cenám v okolních zemích. Z nějakého důvodu došlo k enormní podpoře pouze jednoho obnovitelného zdroje a to fotovoltaiky. Pro ilustraci byla v roce 2008 výkupní cena elektrické energie vyrobené z fotovoltaické elektrárny stanovena na 13,46 Kč/kWh, se zaručenou dobou výkupu stanovenou na 20 let (ERU). Následkem toho došlo k obrovskému nárůstu žádosti o připojení fotovoltaických elektráren především do distribuční, ale i do přenosové soustavy.

Na první pohled, by se mohlo zdát, že výroba elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů se jeví jako ideální, bezproblémový způsob získávání energie. Nicméně skutečnost je naprosto jiná. Tyto zdroje přinášejí řadu problému a nebýt zmíněné dohody z Atén, tak jejich zastoupení v energetické soustavě by pravděpodobně bylo nepatrné. Enormní nárůst instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren v posledních letech, nyní negativně ovlivňuje provoz elektrizační soustavy. Instalovaný výkon fotovoltaických elektráren byl k 1. březnu (podle ERU) 1970,8 MW což je asi 9,8 % instalovaného výkonu elektrizační soustavy České republiky.

Výkon dodávaný fotovoltaickou elektrárnou se mění v důsledku změn intenzity slunečního záření. Kolísání výkonu elektrárny je nutné zálohovat v jiných zdrojích. Velikost tohoto výkonu je závislá na instalovaném výkonu všech fotovoltaických elektráren. Kolísání dodávaného výkonu sebou nese celou řadu dalších problémů, mezi něž patří nestabilita dodávky, změna toku výkonu. Fotovoltaické výroby také ovlivňují kvalitu napětí v přípojném bodě.

Kapitola rozbor provozu fotovoltaických elektráren je zaměřena na základní informace ohledně fotovoltaických článků, panelů a elektráren. Zabývá se také jejich možností připojení k sítí. Další část kapitoly informuje o současném stavu fotovoltaiky z mezinárodního pohledu i v rámci České republiky, včetně dalších možností rozšíření.



Výroba elektrické energie pomocí fotovoltaických elektráren sebou nese celou řadu problému. Obsah třetí kapitoly se proto zabývá vlivem slunečních elektráren na elektrizační soustavu. Kapitola je zaměřena na analýzu dodávky elektrické energie a z jejího provozu vyplývající negativní vlivy na provoz elektrizační soustavy. Náplní následující kapitoly jsou poté možnosti omezení těchto negativních vlivů.

V další kapitole je provedena analýza dodávaného činného výkonu z vybrané fotovoltaické elektrárny. Obsah kapitoly je zaměřen na roční, měsíční i denní dodávky výkonu, koeficienty využití v jednotlivých obdobích. Dále se práce zabývá problematikou dynamiky dodávky výkonu a také posuzuje vliv vybrané elektrárny na rozvodnu, do níž je připojena.

## 2 Rozbor provozu fotovoltaických elektráren

Fotovoltaika je metoda přímé přeměny slunečního záření na elektrickou energii (stejnoseměrný proud). Jedná se o využití fotoelektrického jevu na velkoplošných polovodičových fotodiodách, které jsou nazývány fotovoltaické články. Fotovoltaické články jsou obvykle spojovány sériově.

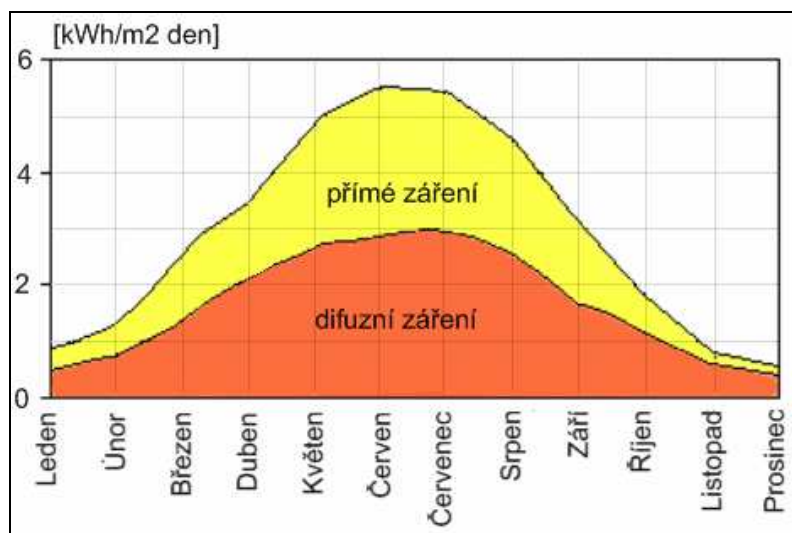
### 2.1 Sluneční záření

Sluneční záření je základní zdroj energie na Zemi. Vzniká jadernými přeměnami v nitru Slunce. Celkové množství energie dopadající na Zemi je určeno sluneční konstantou ( $1360 \text{ W/m}^2$  [4]) a zemským průřezem. Rotací planety a distribuci této energie na celý zemský povrch je průměrná hodnota množství slunečního záření asi čtvrtinová, to je (podle [4]) kolem  $342 \text{ W/m}^2$ .

Sluneční energii dopadající na zemi lze využít dvěma způsoby:

- přímé využití sluneční energie – výroba elektrické energie, zemědělství, zpracování užitkové vody
- nepřímé využití sluneční energie – potenciální energie vody, kinetická energie vzdušných mas, chemická energie biomasy.

Sluneční záření denně dodává stotisíckrát více energie, než je celková světová spotřeba. Toto záření lze rozdělit na přímé a difuzní. Část sluneční energie se rozptýlí, část je absorbována, takže lze naměřit na Saše cca 80 % původní hodnoty, ve středních zeměpisných šířkách 35-40 %, část, cca 30 %, se odráží do mraků, prachových částic a zemského povrchu, asi 70 % se absorbuje [15].



Obr. 1 Přímé a difuzní záření v podmínkách ČR [27].

### 2.2 Historický vývoj

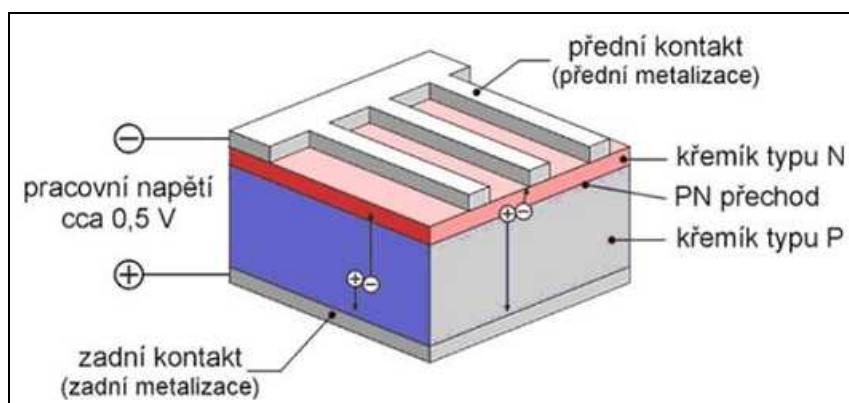
Pojem fotovoltaika pochází ze spojení slov phos (světlo) a ze jména italského fyzika Alessandra Volty. Objev fotovoltaického jevu se připisuje Alexandru Edmondovi Becquerelovi, který jej odhalil v roce 1839 a v roce 1904 jej fyzikálně popsal Albert Einstein. V roce 1916 pak Robert Millikan experimentálně potvrdil platnost principu fotovoltaického jevu.

Prvotní pokusy s fotočládky spadají do sedmdesátých let 19. století, kdy byly poprvé zjištěny změny vodivosti selenu při jeho osvětlení a kolem r. 1883 byl sestrojen první selenový fotočlánek s tenkou vrstvou zlata (Charles Fritts, účinnost pod 1 %). První patent na solární článek pak byl podán v roce 1946 Russellem Ohlem, který také stál na počátku rozvoje křemíkových solárních článků (1941). První skutečný fotovoltaický článek s 6 % účinností byl vyroben z krystalického křemíku v roce 1954 v Bellových laboratořích (G.L. Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller).[25]

Větší rozvoj fotovoltaiky nastává v šedesátých letech s nástupem kosmického výzkumu, sluneční články slouží jako zdroj energie pro družice. Vůbec první družicí využívající k zisku energie sluneční paprsky byl ruský Sputnik 3, vypuštěný 15. května 1957. Dalším důležitým mezníkem pro rozvoj fotovoltaiky a zejména výzkumu a vývoje v této oblasti byla celosvětová ropná krize v roce 1973.[25]

### 2.3 Princip činnosti fotovoltaiky

Fotovoltaika využívá přímé přeměny světelné energie na elektrickou energii v polovodičovém prvku označovaném jako fotovoltaický nebo také solární článek[25]. Fotovoltaický článek se skládá z velkoplošné diody, s alespoň jedním PN přechodem. Dopadá-li na solární článek sluneční záření, generují se v něm elektricky nabitě částice. V polovodiči se z krystalové mřížky začnou uvolňovat záporné elektrony. Dojde k izolaci elektronů a děr vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Rozdělení má za následek vznik rozdílného potenciálu mezi kladným a záporným kontaktem solárního článku a vznikne elektrické napětí, které u křemíkových diod dosahuje hodnoty zhruba 0,5 V. Připojíme-li mezi oba kontakty spotřebič elektrické energie, obvodem začne protékat elektrický proud, který bude závislý na velikosti článku a intenzitě slunečního záření.



Obr. 2 Schematické znázornění funkce solárního článku. [25]

Základním požadavkem na solární články je schopnost pohltit co nejširší oblast slunečního spektra, s co nejlepším využitím energie fotonů.

Dopadne-li na křemík foton o energii větší než 1,1 eV (elektronvoltů), pak je foton absorbován a v polovodiči dojde ke vzniku volných nosičů náboje. Jedná se o záporný elektron a kladnou díru. Tato energie odpovídá šířce zakázaného pásu ( $E_g = E_c - E_v$  [25]). Je-li energie daného fotonu menší než 1,1 eV projde křemíkem a není absorbována.

Sluneční článek se skládá z části mající elektronovou vodivost (materiál typu n, např. křemík s příměsí fosforu) a z části mající děrovou vodivost (materiál typu p, např. křemík s příměsí boru). Na přechodu p-n dojde k oddělení elektronů a děr a na kontaktech vznikne napětí (v případě křemíku typicky 0,5-0,6 V). Připojíme-li ke kontaktům spotřebič (zátěž), protéká tímto elektrický proud. [25]

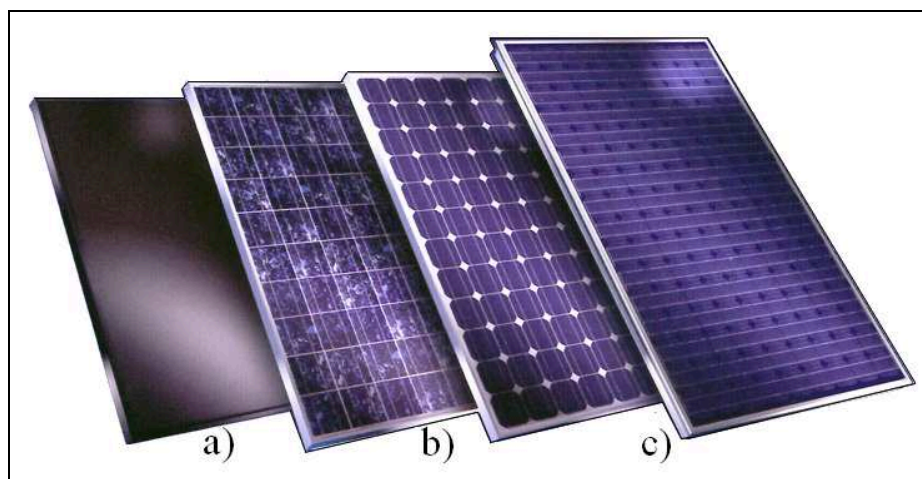
### 2.4 Rozdělení fotovoltaických článků

Základním materiálem pro výrobu fotovoltaických článků z krystalického křemíku jsou (podle [4]) křemíkové destičky, obvykle typu P. V počátcích byly fotovoltaické články vyráběny z monokrystalického křemíku. V pozdější fázi došlo k vývoji multikrystalického křemíku, jehož technologie vedla k úsporám materiálu a snížení investičních nákladů. Postupným vývojem došlo ke značnému přiblížení účinnosti článku s multikrystalického křemíku s článkem z křemíku monokrystalického. [4]

Nejčastěji se používají křemíkové solární lze rozdělit: [4]

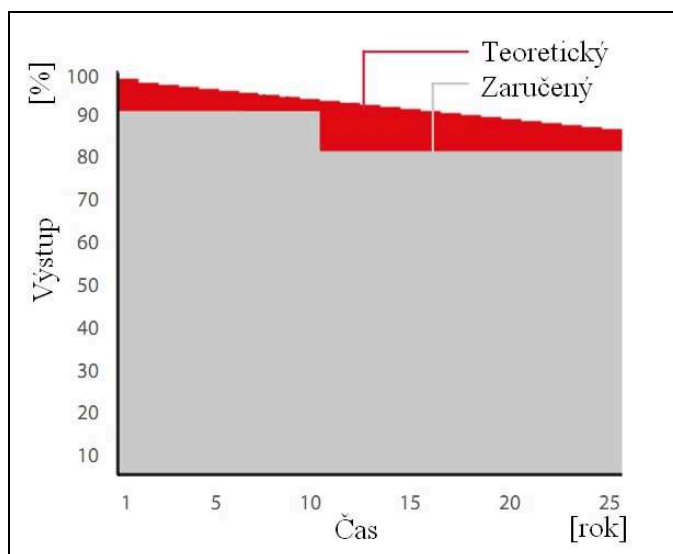
- Amorfni – menší konverzní účinnost 10 %, ale lepší využití rozptýleného záření - panel je schopny vyrobit zhruba o 10% více energie než panely krystalické
- Multikrystalický – pouze částečná stejnosměrná struktura krystalů, účinnost 16 %
- monokrystalické – stejnosměrná struktura krystalů po celé ploše, účinnost 22 %
- Hybridní – kombinuje krystalický a amorfni článek

Jednotlivé druhy fotovoltaických článků jsou zobrazeny na Obr. 3.



Obr. 3 Druhy fotovoltaických článků a) amorfni b) polykrystalický c) monokrystalický. [29]

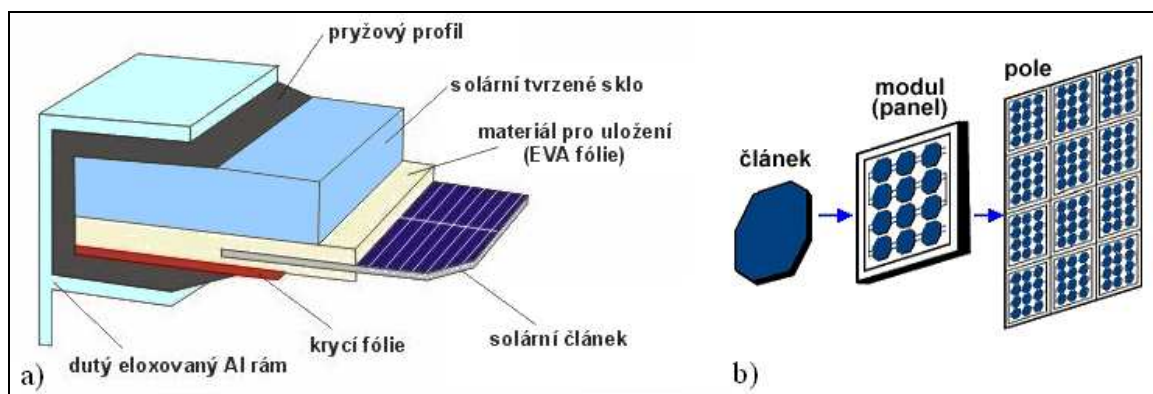
V současné době převládají panely krystalické. Většinou je poskytována záruka 25 let, že výkon neklesne pod 80% [20]. Na Obr. 4 je zobrazen pokles účinnosti fotovoltaického panelu, v závislosti na čase, prezentovaný firmou Suntech.



Obr. 4 Pokles účinnosti v závislosti na čase. [30]

### 2.5 FV panely

Napětí jednoho článku je přibližně 0,5 V. Jelikož má fotovoltaický článek příliš malý výkon, vytvářejí se fotovoltaické panely. Panely jsou navíc chráněny proti mechanickému poškození, povětrnostním vlivům (silný vítr, krupobití, mraz) a snadněji se instalují. Panely se vyrábějí od několika jednotek do 200 kW. Pro větší výkony se panely vzájemně spojují. Panely lze zapojovat sériově i paralelně v závislosti na požadovaném napětí, proudu.



Obr. 5 a) Stavba FV panelu, b) Stavba FV pole. [31]

## 2.6 Ztráty energie ve fotovoltaickém článku

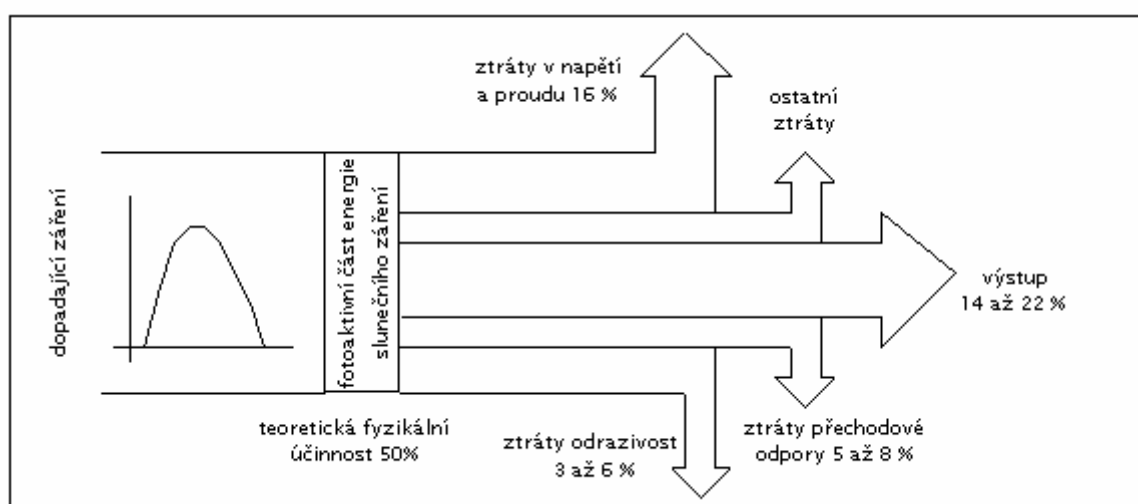
Účinnost fotovoltaických článků závisí na způsobu přeměny energie záření na elektrickou. K poklesu účinnosti článku dochází np. důsledkem stárnutí.

### 2.6.1 V důsledku přeměny energie

V rámci České republiky dopadá na povrch fotovoltaického panelu záření s energií kolem 950 kWh/rok až 1350 kWh/rok. Během přeměny této energie na energii elektrickou dochází, z různých příčin, k jejím ztrátám. Ztráty v jednotlivých fotovoltaických panelech jsou odlišné, závislé na technologii a způsobu výroby.

Monokrystalické panely jsou schopny absorbovat pouze přímé sluneční záření. Panely polykrystalické jsou schopny kromě přímého slunečního záření absorbovat i záření difúzní.

Na Obr. 6 (podle [7]) je orientační hodnoty ztrát při přeměně slunečního záření na elektrickou energii. Běžná účinnost většiny solárních panelů se pohybuje mezi 12 % – 17 %. Ovšem dle nové vyhlášky musí nové sluneční elektrárny s výkonem nad 30 kW dosahovat účinnost 16 % pro polykrystalické panely a 18 % pro monokrystalické.



Obr. 6 Ztráty při přeměně slunečního záření na elektrickou energii.

### 2.6.2 Důsledek stárnutí fotovoltaických panelů

Ve většině případů dochází (podle [7]) ke stárnutí panelů ve dvou rovinách.

- Prvotní stárnutí - Jedná se o rychlý pokles účinnosti během několika prvních let. V predikcích se počítá s hodnotou 3%.
- Dlouhodobé snižování účinnosti - Podle zahraničních výzkumů se odhaduje roční průměrný pokles účinnosti pod 1 %

### 2.7 FV elektrárny

FV elektrárnami můžeme nazvat spojení FV panelu, měniče (střídače) a jistící jednotky. Střídač – zajišťuje přeměnu stejnosměrné hodnoty výstupního napětí z FV pole na hodnotu střídavou o požadované hodnotě napětí. V případě malých elektráren plní rovněž funkci ochrannou (v případě nedodržení požadovaných hodnot napětí a frekvence dojde k odpojení). Maximální účinnost moderních střídačů se pohybuje do 96%. Dynamické chování fotovoltaických zdrojů je především závislé na vlastnostech a parametrech střídačů, které jsou v konkrétní aplikaci jednotlivých fotovoltaických výroben použity [10].

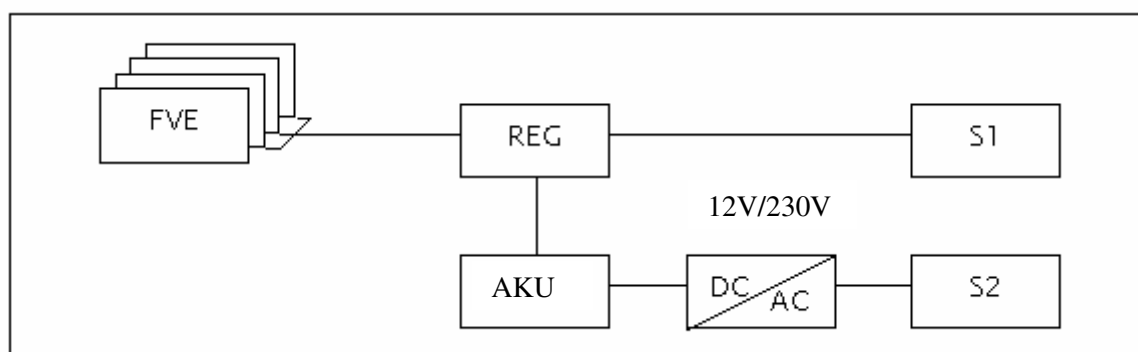
#### 2.7.1 Typy fotovoltaických systémů

Fotovoltaické systémy je možné rozdělit z hlediska způsobu připojení k síti.

##### Grid - off systémy

Jsou to fotovoltaické systémy nezávislé na rozvodné síti. Výkony jednotlivých systémů se pohybují v rozmezí 1 – 10 000 W. Mohou pracovat jako systémy s přímým napájením. To je všude tam, kde nevadí, že poháněné zařízení pracuje pouze v době příznivých povětrnostních podmínek. Dále pak tyto systémy pracují v ostrovním režimu. Vyrobená elektrická energie se zpravidla ukládá do akumulátorů k pozdějšímu využití. Tyto systémy je výhodné použít v místech, kde chybí vedení elektrické energie, případně vzdálenost k distribuční síti je 500 až 1000 m (np. horské oblasti).

Grid - off systémy lze dále rozdělit na systémy s přímým napájením, hybridní systémy a systémy s akumulací elektrické energie. Systémy s přímým napájením se využívají v místech, kde není nutná nepřetržitá dodávka elektrické energie (nabíjení akumulátoru malých přístrojů, čerpání vody). Systém s přímým napájením lze doplnit prvkem schopným akumulovat elektrickou energii, a tím zajistit dostupnost elektrické energie v době nedostatečného slunečního záření. Napětí systému bývá zpravidla 12 V nebo 24 V. Spotřebiče vyžadující napětí 230 V/~50 Hz jsou napájeny přes napěťový střídač. Na Obr. 7 (podle [14]) je zobrazeno blokové schéma ostrovního systému s akumulací elektrické energie, který se skládá z: fotovoltaických panelů (FVE), regulátoru dobíjení (REG), akumulátoru (AKU), střídače, spotřebiče připojeného k síti 12 V (S1) a síti 230 V (S2).



Obr. 7 Blokové schéma ostrovního systému s akumulací elektrické energie (12V i 230V).

### Hybridní systémy

Hybridní systémy se používají tam, kde je nutný dlouhodobý provoz se značným vytížením. Tyto systémy je nutné navrhovat i na zimní přenos, což má za následek zvýšení instalovaného výkonu a tím i podstatné zvýšení pořizovacích nákladů. Je to proto výhodné doplnit systém o jiný zdroj elektrické energie. Nejčastěji se jedná o větrnou elektrárnu, kogenerační jednotku, elektrocentrálu a podobně.

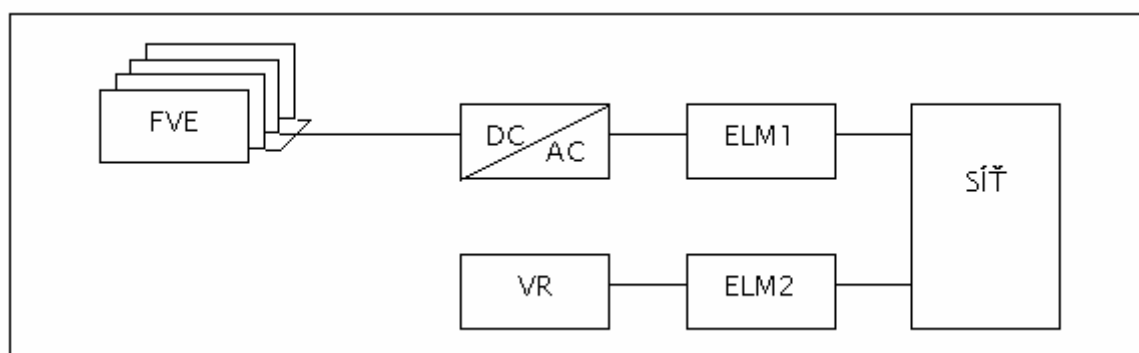
### Grid – on systémy

Nejčastěji se uplatňují v oblastech s dostatečnou hustotou elektrických sítí. V případě dostatečného slunečního svitu jsou spotřebiče v budově napájeni z vlastní sluneční elektrárny, případný přebytek je dodáván do rozvodné sítě. Při nedostatku vlastní energie je potřebná energie dodávána z rozvodné sítě. Systém pracuje automaticky z důvodu mikroprocesorového řízení síťového střídače. Špičkový výkon fotovoltaických systémů připojených k rozvodné síti je v rozmezí jednotek kilowatt až jednotek megawatt. [25]

Na Obr. 8 (podle [14]) je zobrazeno blokové schéma grid - on systému, které se skládá z: fotovoltaických panelů (FVE), střídače, elektroměrů (ELM1, ELM2), veřejných rozvodů (SÍŤ) a vnitřních rozvodů (VR).

Základními prvky grid - on fotovoltaického systému jsou:

- fotovoltaické panely
- střídač (230V/~50Hz)
- kabeláž
- měření vyrobené elektrické energie (elektroměr)
- případně zařízení pro sledování Slunce, indikační a měřicí přístrojů

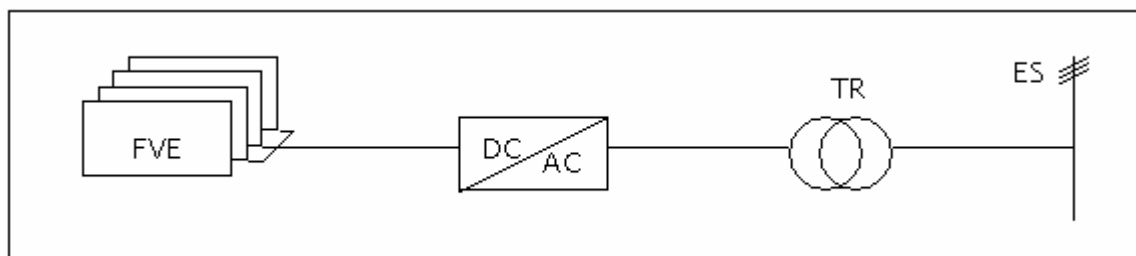


Obr. 8 Blokové schéma grid - on systému.



### Přímé připojení na elektrizační soustavu.

Tento typ systému je určen pouze pro výrobu elektrické energie a její následný prodej. Na Obr. 9 (podle [14]) je zobrazeno možné připojení fotovoltaické elektrárny k přenosové soustavě, které se skládá z: fotovoltaických panelů (FVE), střídače, transformátoru (TR) a elektrizační soustavy (ES).

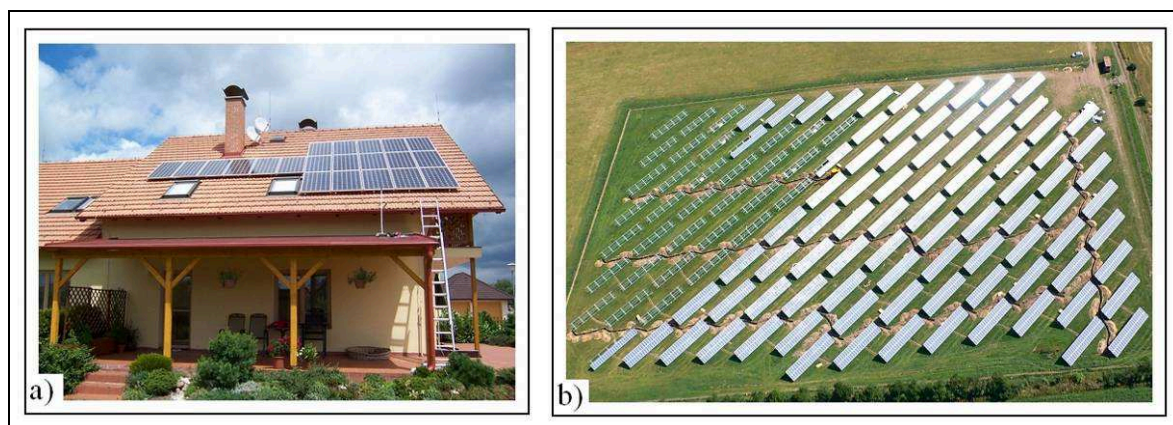


Obr. 9 Blokové schéma možného připojení FVE k přenosové soustavě.

### 2.7.2 Rozdělení FV elektráren:

Podle umístění lze fotovoltaické elektrárny rozdělit na:

- malé střešní instalace – Výkon pár kWp. Na Obr. 10 a) je instalace o výkonu 3,75 kWp.
- velké střešní instalace – Od výkonů přesahujících 10 kWp až do jednotek MWp.
- volně stojící instalace – Výkony v řádech stovek kWp až do jednotek MWp. Na Obr. 10 b) je zobrazena 1. etapa výstavby FVE v Českých Velenicích, o instalovaném výkonu 1,1 MWp.

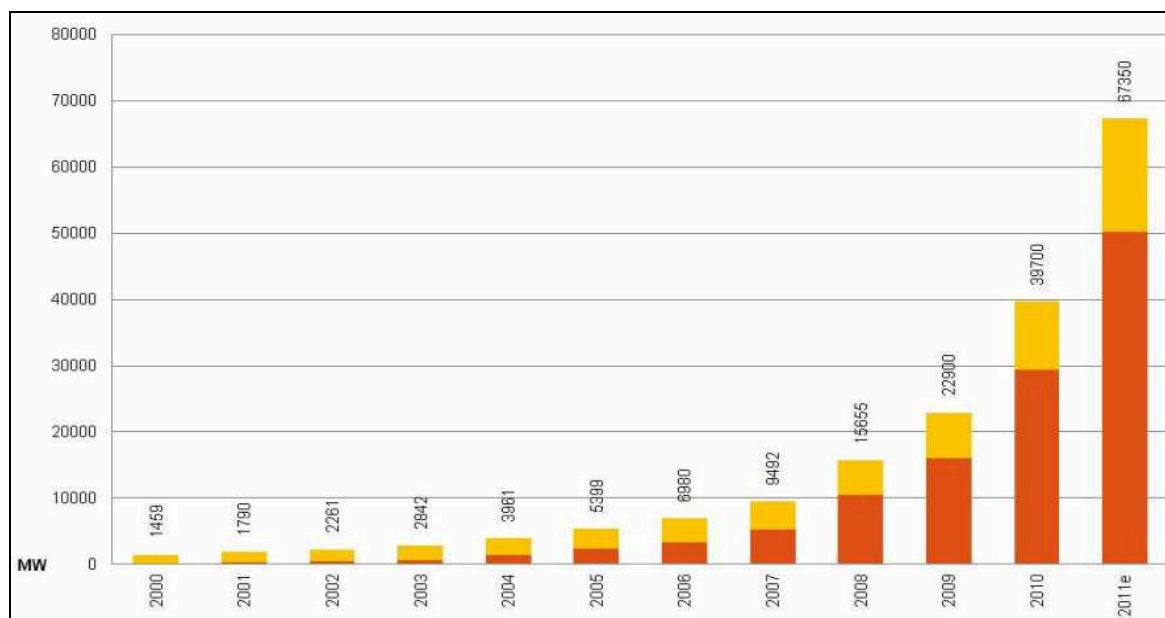


Obr. 10 FVE a) Malá střešní instalace b) Volně stojící instalace.[31]

## 2.8 Fotovoltaika v mezinárodním pohledu

Ve světovém měřítku je fotovoltaika stále velice aktivně rozvíjející se oblast. V roce 2011 bylo celosvětově do sítě připojeno 27,7 GW instalovaného výkonu, což znamená asi 70 % meziroční růst. Instalovaný výkon fotovoltaických zdrojů v roce 2011 dosáhl výše 67,4 GW. Na

této hodnotě se Evropská Unie podílí 50,3 GW což je asi 75 %. Na nárůstu se nejvíce podílely Itálie, která do sítě připojila 9000 MW, a Německo se 7500 MW, což dohromady činí 60 % celkového nového výkonu. Mimo EU k rozšíření fotovoltaiky nejvíce přispěla s 2000 MW Čína. Na OBR je zobrazen vývoj světového instalovaného výkonu ve fotovoltaických zdrojích během posledních jedenácti let.



Obr. 11 Nárůst fotovoltaiky v posledních letech. [23]

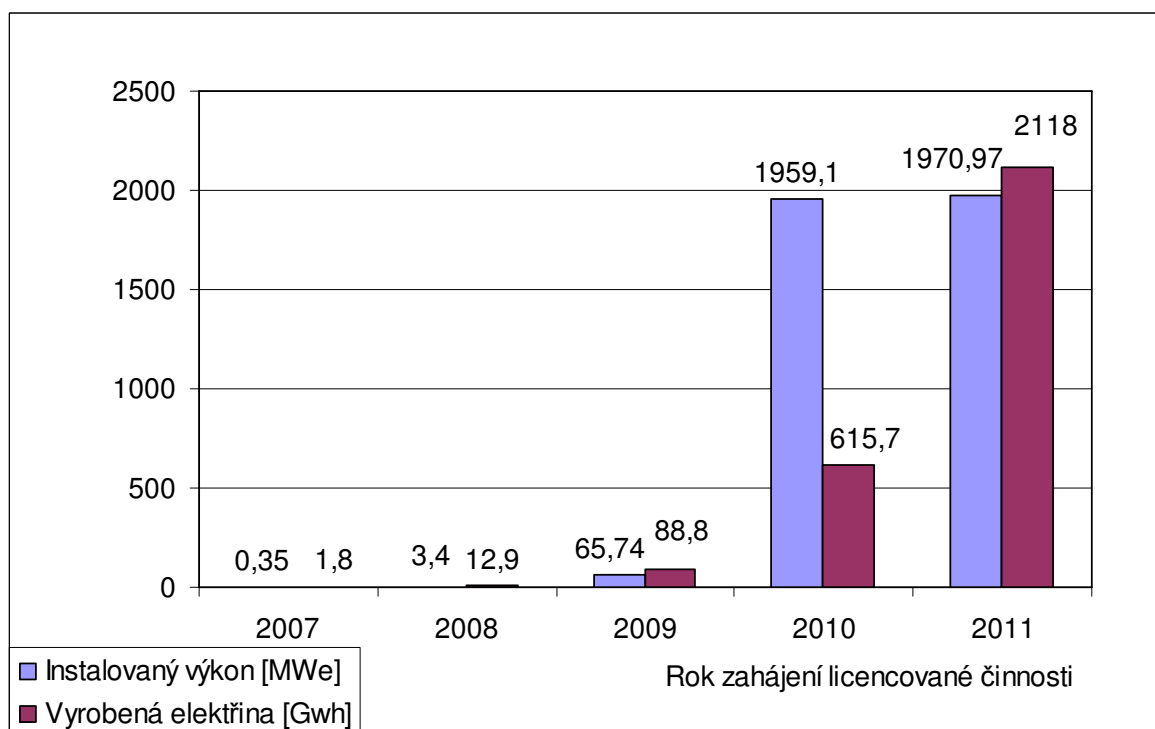
## 2.9 Sluneční energetika v ČR

Během posledních let došlo v České republice k obrovskému rozmachu výroby elektrické energie pomocí slunečních elektráren i v České republice.

### 2.9.1 Současný stav FVE v ČR

V současnosti (stav k 31.12.2011, podle ERU) je instalovaný výkon fotovoltaických elektráren v ČR 1970,97 MW. Oproti roku 2010 se tedy instalovaný výkon zvýšil o 11,87 MW. Největší rozmach fotovoltaiky proběhl v roce 2009, kdy se instalovaný výkon zvýšil zhruba třiceti násobně, na hodnotu 1959,1 MW. Tento rozmach způsobil zákon 180/2005 Sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, podpořen faktem, že výkupní cena elektrické energie z fotovoltaických výroben připojených v roce 2010 byla stanovena na 12,25 Kč/kWh (Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2009). V roce 2010 se ve slunečních elektrárnách vyrobilo 615,7 GWh elektrické energie. To je oproti roku 2009, kdy se solární energie vyrobilo 88,8 GWh, asi šestinásobný nárůst. V roce 2011 (stav k 1. 1. 2012, podle ERU) se vyrobilo

2118 Gwh. Na Obr. 12 je zobrazen instalovaný výkon fotovoltaických elektráren a množství jimi vyrobené elektrické energie během posledních pěti let.

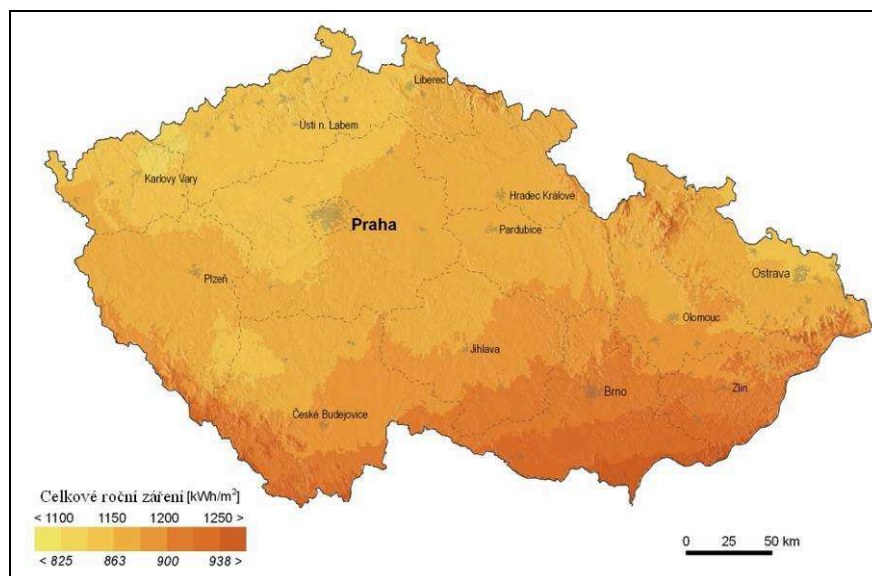


Obr. 12 Provoz slunečních elektráren v ČR, stav k 1. 1. 2012.

### 2.9.2 Lokality v ČR, vhodné k další výstavbě

Pro stanovení teoretického potenciálu FV elektráren, je jediným omezením dostatek vhodné plochy pro instalaci solárních panelů. Solární panely mohou být součástí všech střech a fasád různých typů budov. Na Obr. 13 je zobrazeno roční sluneční záření v ČR, z něho je jasně patrné, že nejlepší lokality pro výstavbu fotovoltaických elektráren se nachází na jižní Moravě.

Problém je ovšem v tom, že tuzemská elektrizační soustava je (podle ČSRES) od začátku roku 2010 provozována na hranici bezpečného limitu pro nestabilní zdroje (FVE a VTE). Kromě již připojených zdrojů je nutné připočítat výkony, které jsou již provozovatelem přenosové soustavy a provozovateli distribučních soustav smluvně potvrzeny. V období od března do června roku 2011 provedli energetici více než 100 dlouhodobých měření v sítích nízkého a vysokého napětí, aby zjistili vliv fotovoltaických zdrojů na bezpečný provoz soustavy.



Obr. 13 Sluneční záření a elektrický potenciál v ČR. [33]

Měřením se došlo k těmto závěrům [10]:

- Byl zjištěn výrazný vliv FVE na hodnotu napětí; v sítích nízkého napětí více než ve 30 % případů a v sítích vysokého napětí ve více než 11 % případů nebyly dodrženy parametry kvality.
- Nejčastěji byly překročeny povolené hodnoty flikru
- Méně výrazně pak došlo k ovlivnění dalších parametrů kvality napětí

Provedená měření potvrzují, že připojení každého zdroje, včetně FVE s nízkým instalovaným výkonem, musí být individuálně posouzeno i z hlediska vlivu na kvalitu dodávky elektrické energie.[10]

Toto neplatí pro několik regionů, ve kterých (podle [28]) už je bilanční limit naplněn.

- Bilanční limit naplněn do roku 2020 - celý Karlovarský kraj, západní část Ústeckého kraje, západ Středočeského kraje.
- Bilanční limit naplněn do roku 2014 - střední část Olomouckého kraje, severovýchod Zlínského kraje.
- Bilanční limit naplněn, není jasné dokdy - jih Středočeského kraje (okres Příbram).

### **3 Vliv slunečních elektráren na ovlivnění provozu distribučních sítí**

Sluneční elektrárny, stejně jako ostatní zdroje elektrické energie, jsou ve většině případů napojeny na elektrizační soustavu. Je proto nutné sledovat, a udržovat v patřičných mezích, elektrickou energii dodávanou z těchto zdrojů, z důvodu negativních vlivů elektrárny na elektrizační soustavu.

#### **3.1 Elektrizační soustava**

Elektrizační soustava je (podle kodexu PS) vzájemně propojený soubor pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, včetně elektrických přípojek a přímých vedení, a systémů měřicích, ochranných, řídicích, zabezpečovacích, informačních a telekomunikačních technik. Pro další popis si lze vystačit s následujícím zjednodušením: elektrizační soustava se skládá ze zdrojů, sítě a spotřebičů. Základní požadavek propojených ES, je udržování přenosových parametrů elektrizační soustavy v požadovaných mezích, a v každém časovém okamžiku zajišťovat dostatečné množství výkonových rezerv. Elektrizační soustava se dělí na přenosovou soustavu a na soustavu distribuční.

Elektroenergetická přenosová soustava 400 kV a 220 kV, často nazývaná „páteřní“, slouží k rozvedení výkonu z velkých elektráren do celého území České republiky a zároveň je součástí mezinárodního propojení Evropy. Napájí elektřinou distribuční soustavy, které ji dále rozvádějí až ke konečným spotřebitelům. Přeshraničními vedeními je přenosová soustava ČR napojena na soustavy všech sousedních států, a tím synchronně spolupracuje s celou elektroenergetickou soustavou kontinentální Evropy.[11]

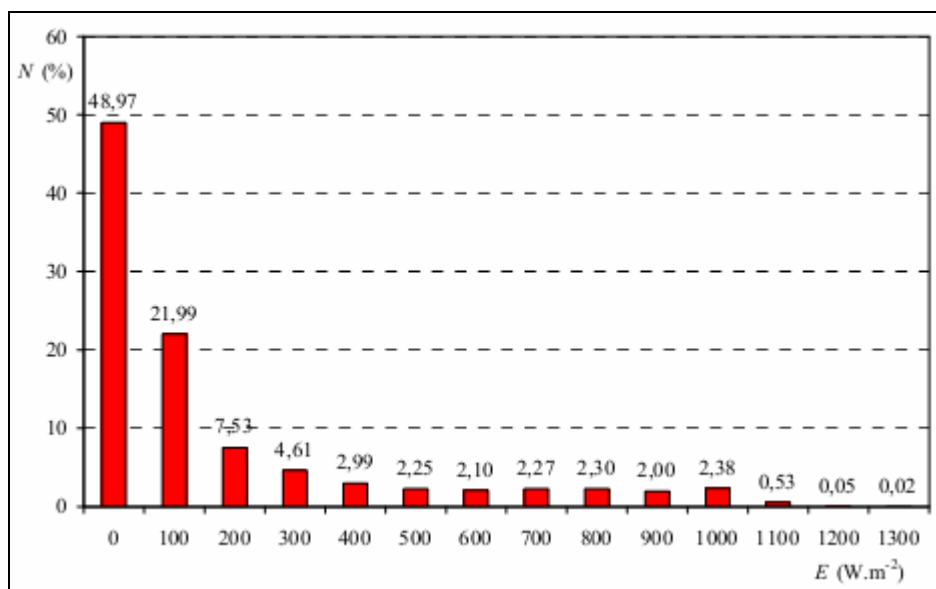
Na přenosovou soustavu navazuje distribuční soustava. Distribuční soustava byla navržena jako soubor zařízení pro rozvod elektrické energie z přenosové soustavy nebo ze zdrojů zapojených do ní ke koncovým uživatelům. Součástí distribuční soustavy jsou i její řídicí, ochranné, zabezpečovací a informační systémy. V elektrizační soustavě České republiky se jedná o zařízení s napětím 110 kV a nižším.

#### **3.2 Analýza dodávek elektrické energie ze slunečních elektráren**

Typická vlastnost sluneční elektrárny je, že její okamžitý dodávaný výkon, je přímo úměrný intenzitě dopadajícího slunečního záření. Sluneční záření kolísá v závislosti na natočení země vůči slunci a na povětrnostních vlivech. Tomu odpovídá dodávaný výkon sluneční elektrárny, který se může pohybovat ve škále celého instalovaného výkonu, v časovém intervalu i několika minut. Tento jev sebou přináší řadu komplikací, se kterými se musí provozovatel distribučních sítí vypořádat.

### 3.2.1 Intenzita slunečního záření

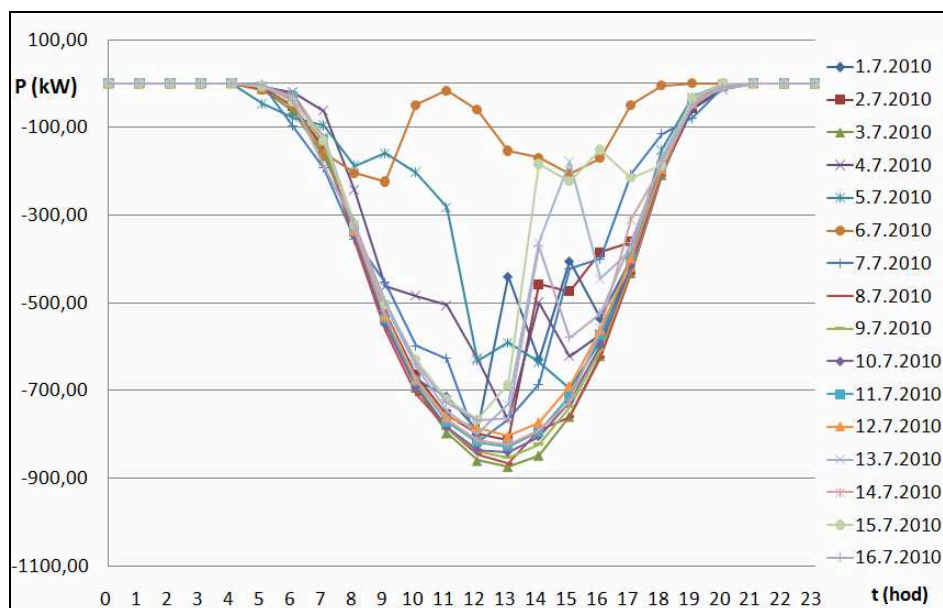
Výkon sluneční elektrárny závisí primárně na meteorologických podmínkách v lokalitě instalace sluneční elektrárny. Na Obr. 14 je zobrazen histogram četnosti intenzity slunečního záření ve sledované lokalitě. Rozsah intenzit záření se pohybuje v rozmezí od 0 do  $1300 \text{ W.m}^{-2}$ . S grafu je také patrné, že zvyšuje-li se intenzita slunečního záření, dochází k poklesu četnosti výskytu těchto hodnot. Téměř v polovině případů je hodnota intenzity slunečního záření nulová.



Obr. 14 Histogram četnosti intenzity slunečního záření. [3]

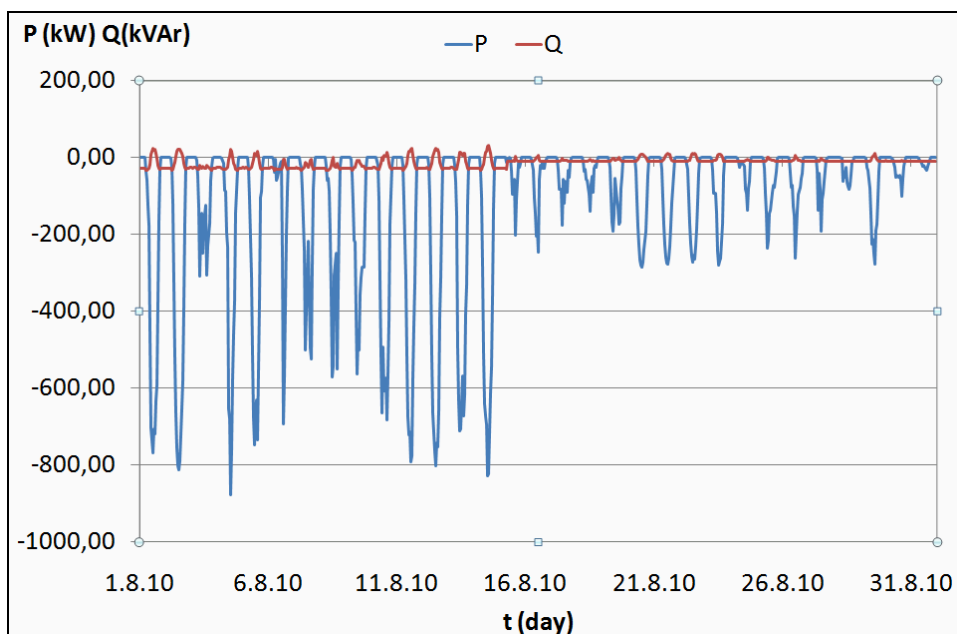
### 3.2.2 Výkon dodávaný elektrárnou

Sluneční elektrárna, začíná pracovat s východem slunce. V poledních hodinách, jsou li přílivité podmínky, dosahuje maxima. Tato hodnota se v průběhu roku mění v závislosti na intenzitě slunečních paprsků a na jejich sklonu. Tyto změny jsou způsobeny změnami natočení země vůči slunci, v závislosti na roční době. Na Obr. 15 je zobrazena typická křivka výkonu solárních elektráren. Jedná se o průměrné hodnoty jednotlivých dnů sledovaného období. Graf ukazuje dodávaný výkon sledované elektrárny v období mezi 1. až 16. červencem roku 2010. Jedná se tedy o letní měsíc, kdy se předpokládají výborné sluneční podmínky. Předpoklady byly splněny. Ve většině případů elektrárna dodávala v poledních hodinách výkon řádově 800 až 900 kW. V několika dnech byl výkon nižší. Nejhorší situace nastala 6. července, kdy dodávaný výkon nepřekročil 200 kW. Tento výsledek byl pravděpodobně způsoben vysokou oblačností.



Obr. 15 Nárůst výkonu FVE. [2]

Na Obr. 16 jsou zobrazeny dodávky výkonu v měsíci srpnu. Je zachycen rozdíl mezi příznivými a nepříznivými slunečními podmínkami. První polovina měsíce byla velice příznivá a výkon dodávaný elektrárnou dosahoval 800 kW. V druhé polovině ovšem došlo ke zhoršení počasí a dodávaný výkon do sítě nepřekročil hranici 300 kW.

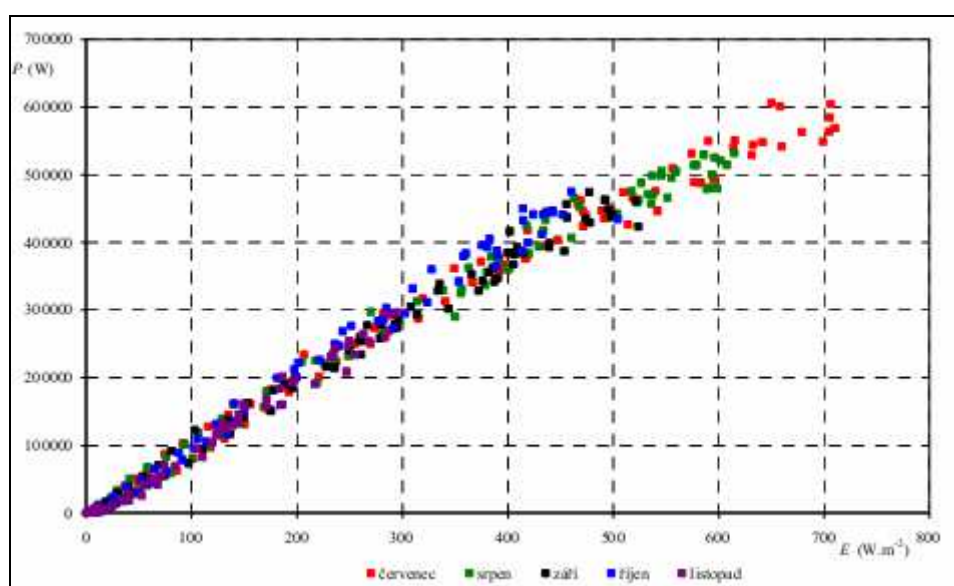


Obr. 16 Činný a jalový výkon FVE srpen 2010. [2]



### 3.2.3 Výkonová křivka fotovoltaické elektrárny

Výkonová křivka fotovoltaické elektrárny je závislost výkonu fotovoltaické elektrárny na slunečním záření. Na Obr. 17 je zobrazena výkonová křivka fotovoltaické elektrárny o instalovaném špičkovém výkonu 1100 kWp, nacházející se v Moravskoslezském kraji. Graf je barevně rozlišen, pro jednoduché určení, v jakých částech křivky pracuje elektrárna v jednotlivých měsících. Největší výkon je dodáván v letních měsících, kdy jsou hodnoty intenzity slunečního nejvyšší. V zimních měsících je situace opačná. Směrnice výkonové křivky je však stejná pro všechny měsíce a je možné konstatovat, že závislost výkonu elektrárny na intenzitě slunečního záření je lineární. [3]



Obr. 17 Výkonová křivka elektrárny – průměr. [3]

### 3.2.4 PQ diagram

Zanedbáme-li vlastnosti kabelové přípojky, transformátoru a chodu měničů naprázdno, tak z principu pracuje fotovoltaická elektrárna s nulovou složkou jalového proudu, což je pro provozovatele elektrárny zdánlivě ideální stav.

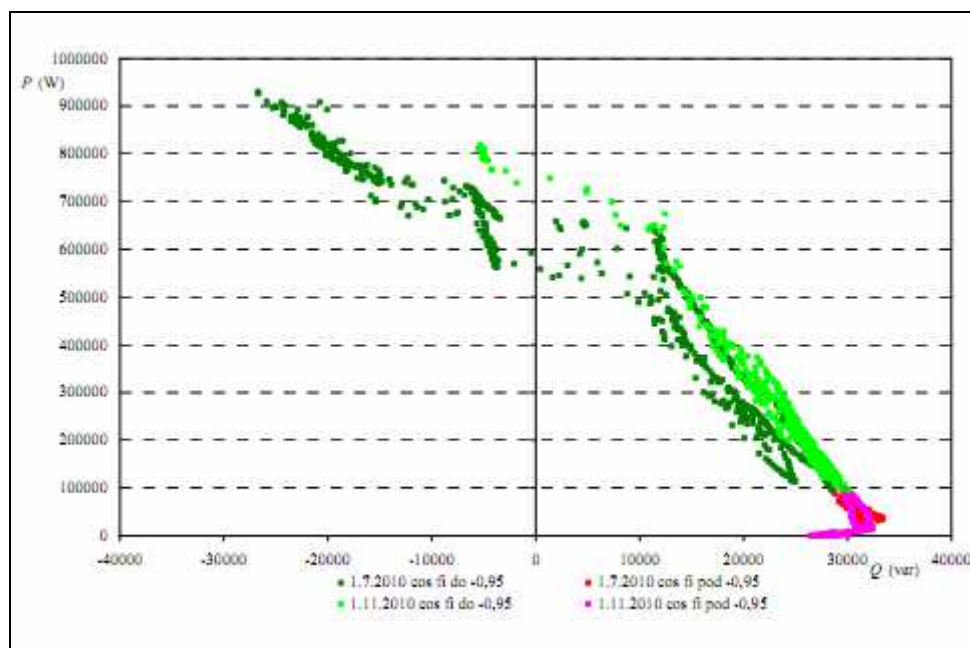
V případě malých dodávek činného výkonu ovšem nemusí být, z důvodu jalových výkonů transformátorů a ventilátorů, neutrální účinník dodržen. Bilance jalového výkonu v přípojném místě může, z důvodu dlouhých kabelových vedení, vykazovat kapacitní charakter. Tato situace je ještě horší, protože nevyžádaná dodávka kapacitního výkonu je zpoplatněna. Fotovoltaickou elektrárnu je proto nutno osadit vhodným kompenzačním zařízením.

Na následujícím grafu na Obr. 18 je zobrazen PQ diagram s provozními stavy vybrané fotovoltaické elektrárny ve dvou dnech. Jedná se o jeden den v letním měsíci (1.7.2010) a jeden den v podzimním měsíci (1.11.2010). Provozní stavy elektrárny jsou rozlišeny barevně.



Stav, ve kterém je hodnota účinníku splněna je zobrazen zeleně, stav ve kterém není je zobrazen červeně. Z PQ diagramu je patrné, že elektrárna má tři základní stavy. První je při dodávce výkonu do 100kW, v tomhle případě není střídač schopen dodržet požadované meze a elektrárna odebírá ze sítě maximální množství jalového výkonu. Druhý stav je asi do 600 kW, kdy elektrárna stále částečně odebírá jalový výkon. Při dodávkách nad 600 kW jalový výkon dodává.

Problém s udržení účinníku mívá elektrárna v podzimních a zimních měsících, kdy je intenzita slunečního záření nižší.



Obr. 18 PQ diagram provozních stavů elektrárny. [3]

#### 3.2.5 Koefficient využití

Velkou nevýhodou fotovoltaických zdrojů je skutečnost, že dodávaný výkon nezávisí pouze na denní době, ale taky na ročním období. Intenzita slunečního záření se v zimních měsících sníží a výkon dodávaný elektrárnou se zmenší zhruba o polovinu. Pro určení efektivity energetického zdroje se používá koeficient využití, který je určen vztahem:

$$k_v = \frac{W_T}{P_i \cdot h} \quad (1) [3]$$

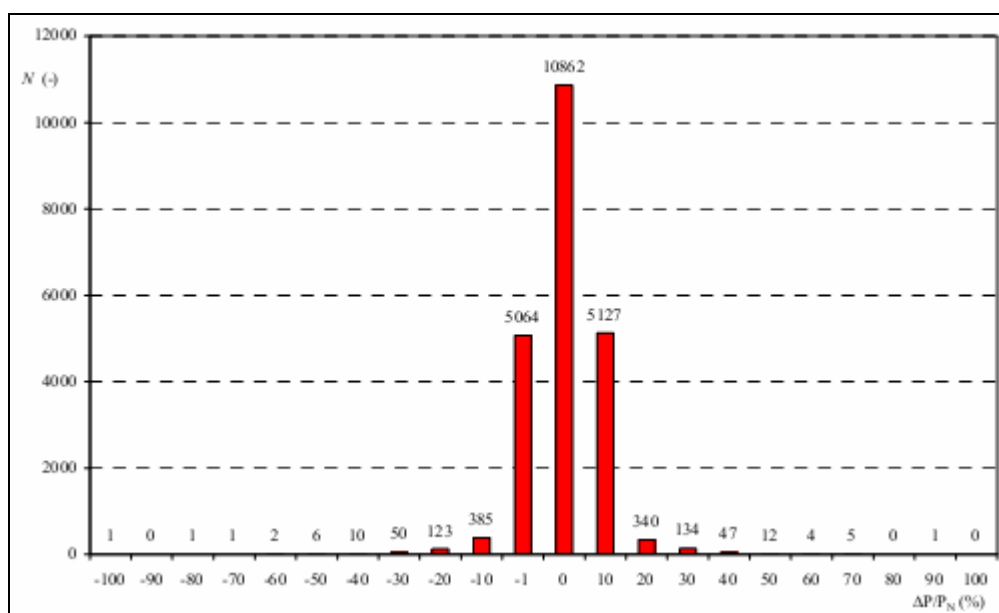
kde:  $W_T$  množství vyrobené energie (kWh)  
 $P_i$  instalovaný výkon (kW)  
 $h$  počet hodin

Koeficient využití je parametr, který nám poskytuje pohled na využití sluneční elektrárny. Předpokládaný koeficient využití, se v rámci České republiky, pohybuje kolem hodnoty 10% (viz. [3]), pro roční hodnocení provozu.

Z textu uvedeného výše vyplývá, že sluneční elektrárna je zdroj schopný dodávat značné množství elektrické energie. Dodává ho ovšem pouze v době příznivých podmínek, a to kolísavě. Jak je známo, výkonová bilance v ES musí být stále v rovnováze, proto kolísání výkonu způsobuje značné problémy. Tyto výsledky jsou důležité pro provozovatele elektrizační soustavy, do níž je výkon vyveden, pro optimální plánování rezerv. Z toho plyne nutnost držení zálohy výkonu v jiných zdrojích, schopných dodávat výkon podle potřeby.

#### 3.2.6 Dynamika variability činného výkonu

Časová změna toku výkonu, nazývána také dynamika variability činného výkonu, je další charakteristická vlastnost solární elektrárny. Jedná se o charakteristiku důležitou pro plánování rezerv výkonu v případě velkých změn výkonu anebo výpadku dodávky. Tato charakteristika je podstatná pro provozovatele energetické soustavy, protože lze z ní vyčíst počet změn ve sledovaném období podle jejich velikosti a na tyto změny dodávaného výkonu se připravit. Využívá se jako podklad analýzy stability soustavy, dále pak pro sestavení konceptu chránění. Pro vykreslení této charakteristiky se využívají data z dlouhodobého měření, s rozlišnými meteorologickými podmínkami. Na Obr. 19 je zobrazen výsledek dynamické variability činného výkonu. V minutových intervalech je porovnávána změna činného výkonu k jmenovitému a je sledována absolutní četnost rozdílů výkonů.



Obr. 19 Počet změn výkonu. [3]

### **3.3 Zpětný tok výkonu v distribučních sítích**

Fotovoltaické elektrárny jsou do distribuční sítě připojovány přes výkonové transformátory. Jedná-li se o elektrárnu velkého výkonu, připojenou do distribuční soustavy na konci paprskového vedení, můžou nastat nepříznivé jevy nejen pro distribuční síť.

Nastane-li stav, že dojde k nárůstu dodávky elektrické energie z fotovoltaické elektrárny, a současně k poklesu odběru elektrické energie v síti, dojde ke zpětnému toku činného výkonu výkonového transformátoru, což způsobí zvýšení napětí v přípojném bodě.

Tento stav byl analyzován v oblasti jižní Moravy (viz [12]). Nejvýraznější byla situace v rozvodnách Hrušovany nad Jevišovkou a Hodonice. Rozvodna Hrušovany nad Jevišovkou 110/22 kV má typický odběr 10,5 MW. Do této rozvodny pracuje 28 fotovoltaických elektráren o celkovém výkonu 43,1 MW. Ovšem v případě provozu fotovoltaických elektráren byl zaznamenán opačný směr toku výkonu, do nadřazené rozvodny Sokolnice 220/110 kV, o velikosti 39,2 MW. Podobná situace, ačkoliv v mnohém menším rozsahu, nastala i v rozvodně Hodonice. Jedná se o rozvodnu 110/22 kV, která napájí oblast 10,2 MW. Do rozvodny pracuje 11 fotovoltaických elektráren o celkovém výkonu 11,2 MW. V případě provozu fotovoltaických elektráren došlo k přetoku výkonu 3,7 MW do nadřazené rozvodny Sokolnice. U sítí 110 kV ovšem tento jev nepředstavuje významný problém.

V sítích 22 KV je situace opačná. Tyto sítě jsou provozovány jako radiální, napájené z jedné strany, a tak k jejich ochraně dříve stačily nesměrové nadproudové ochrany. S možností otočení směru toku výkonu přichází nutnost instalovat ochrany směrové a řešit nové poruchové stavy. Tato skutečnost znamená pro provozovatele distribuční sítě jistě značné náklady na investice do rozvoje této sítě. Dispečerů se svými řídicími programy musí být připraveni na nové provozní stavy sítě tak, aby byli schopni správně vyhodnotit případné poruchy v ní. [12]

V běžném stavu se regulace soustavy provádí na sekundární straně výkonového transformátoru. Ovšem v případě zpětného toku činného výkonu je regulace napětí obtížná. Nabízí se možnost regulace na primární straně výkonového transformátoru. Jenže tato činnost, může způsobit změnu napětí na přenosové soustavě. Další možnost regulace napětí je pomocí změny velikosti jalové energie, která ovšem přináší zvýšení celkových ztrát v přenosové cestě.

Jedinou možností jak omezit tento zpětný tok je snížit výrobu v decentralizovaných nebo jiných zdrojích. V případě fotovoltaických elektráren ovšem vzniká ekonomický problém, z důvodu zajištěné dotace na výkupní ceny z těchto energetických zdrojů. Protože majitelům elektráren omezování výroby snižuje zisky.

#### **3.4 Ztráty při přenosu**

Velké fotovoltaické parky jsou připojeny do sítí vysokého napětí. Některé výrobní jsou připojené přímo do přenosové soustavy. To znamená minimálně dvojí transformaci. Při každé transformaci ovšem dochází ke ztrátě přenášené energie. Jedná se přibližně o jedno procento. Další ztráty vznikají na elektrickém vedení, nejhorší situace je samozřejmě při přenosu na větší vzdálenosti.

U malých systému na budovách je situace odlišná. Je-li v určité oblasti aktuální výkon fotovoltaických elektráren nižší, než je aktuální spotřeba, spotřebuje se v bezprostředním okolí místa výroby. V tomto případě nedochází ke zpětnému toku činného výkonu. Na krátké vzdálenosti jsou ztráty v přenosu zanedbatelné a k transformaci ve výkonovém transformátoru vůbec nedochází.

#### **3.5 Snížení zkratového výkonu sítě**

Fotovoltaická elektrárna je „měkký“ zdroj s nulovým příspěvkem ke zkratovému výkonu. Tato skutečnost je způsobena typickou vlastností fotovoltaických výroben, protože tyto elektrárny nejsou (viz [26]), a ani technicky být nemohou zdrojem zkratového proudu. Velikost maximálního dodávaného výkonu je určena pouze jejich instalovaným výkonem.

Nasazování nadměrného počtu slunečních elektráren, nutí provozovatele sítí, omezit provoz elektráren s točivými stroji. Tím dochází k omezení celkového zkratového výkonu sítě, který se skládá ze zkratových výkonů jednotlivých elektráren s točivými elektrickými stroji. Výsledkem toho dochází k poklesu „tvrdosti“ soustavy, čímž se zvyšuje pravděpodobnost kolísání napětí, vyvolaného změnami činného a jalového výkonu.

Další komplikací bude nutnost provést změnu konceptu chránění. Protože změnou zkratového výkonu sítě nebudou funkční proudové ochrany se zkratovými popudovými články. Poruchy budou vypínány nadproudovými články s delším časovým zpožděním, což v kombinaci poklesu napětí v místě poruchy může vyvolat změny v přenosové soustavě bez možnosti včasné regulace napětí.

#### **3.6 Omezení vlivů fotovoltaických elektráren na elektrizační soustavu**

Obrovský rozmach fotovoltaiky s jejich vysokým dodávaným špičkovým výkonem, který místy přesahuje desítky MW, způsobil zpřísnění podmínek pro připojení a chování těchto výroben v elektrické síti.

### **3.6.1 Vybrané meze z kodexu přenosové soustavy**

Sluneční elektrárny s vysokým instalovaným výkonem se často připojují přímo do přenosových soustav. V tomto případě ovšem musí plnit podmínky dané v kodexu přenosové soustavy, které omezují jejich negativní vlivy na provoz elektrizační soustavy.

#### **Frekvenční a napěťové meze v PS pro provoz**

Solární elektrárna musí být schopna trvalé dodávky výkonu v rozsahu napětí v přenosové síti 400 kV +/- 5% , 220 kV +/- 10%. Fotovoltaická elektrárna musí být schopna trvalé dodávky výkonu bez omezení v rozsahu frekvence přenosové sítě: 49,5 – 50,5 Hz.

#### **Maximální růst dodávaného činného výkonu**

Doporučená hodnota růstu činného výkonu je 1 MW/min - 30 MW/min nebo 10 % z instalovaného výkonu za minutu, konkrétně dle dohody s PPS.

#### **Požadavky na chování FVE při poruchách v síti**

Elektrárny připojené do přenosové sítě se při poruchách musí odpínat selektivně. V případě blízkých i vzdálených zkratů zdroje musí podporovat napětí přídatnou dodávkou jalového výkonu do sítě, která je k dispozici navíc vůči jalovému výkonu elektrárny před zkratem. Zvýšená dodávka Q se uplatňuje při symetrických i nesymetrických poruchách.

- Zvýšení dodávky Q musí následovat do 20 ms od výskytu zkratu.
- Doba zvýšené dodávky Q je do 3 sec po zkratu, pak následuje přechod na standardní režim.
- Požadované hodnoty vychází z požadavku 2 % zvýšení proudu při 1 % poklesu napětí.

### **3.6.2 Dispečerské řízení**

Novelou energetického zákona provedenou zákonem č. 211/2011 Sb., kterým se mění zákon č. 458/2000 Sb., byla s účinností od 18. srpna 2011 výrobcům elektřiny uložena povinnost vybavit výrobní technickým zařízením umožňujícím dispečerské řízení.

- Výrobcům elektřiny s instalovaným výkonem 2 MW a více uvedeným do provozu před nabytí platnosti tohoto zákona do 30. června 2012.
- Výrobcům elektřiny s instalovaným výkonem od 100 kW do 2 MW uvedeným do provozu před nabytí platnosti tohoto zákona do 30. června 2013.

Což znamená, že elektrárny nad 100 kW musí být vybaveny zařízením, schopným elektrárnu v případě potřeby odpojit od sítě, což zamezí dodávku elektřiny z výroby v době přebytku elektrické energie v síti. Regulace činného výkonu bude probíhat stupňovitě v režimu 100 %, 60 %, 30 % a 0 %.

## 4 Variantní řešení podpůrných služeb pro omezení negativních vlivů slunečních elektráren na elektrizační soustavu

Jak již bylo uvedeno sluneční elektrárna je zdroj schopný dodávat značné množství elektrické energie. Dodává ho ovšem pouze v době příznivých podmínek, a to kolísavě. Jak je známo, výkonová bilance v ES musí být stále v rovnováze, proto kolísání výkonu způsobuje zvyšování nároku na výkonové rezervy. Z toho plyne nutnost držení zálohy výkonu v jiných zdrojích, schopných dodávat potřebný výkon v optimálním čase.

### 4.1 Stabilita elektrizační soustavy

Pro pochopení problematiky držení zálohy výkonu je vhodné vysvětlit základní pojmy ohledně stability elektrizační soustavy.

Základním požadavkem spolehlivého provozu propojených elektrizačních soustav je udržování výkonové rovnováhy. Jedním, ze základních problémů zajištění plynulé dodávky elektrické energie je, že jí nelze skladovat v potřebném rozsahu. Výroba musí probíhat v době spotřeby. Je nutné udržovat v každém okamžiku rovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie.

$$S_v(t) = S_s(t) + S_z(t) + S_a(t) \quad (2) \quad [2]$$

kde:  $S_v(t)$  vyrobená elektrická energie (W)  
 $S_s(t)$  spotřebována elektrická energie (W)  
 $S_z(t)$  ztráty elektrické energie (W)  
 $S_a(t)$  akumulace elektrická energie (W)

Zdánlivý výkon je vektorovým součtem činné a jalové složky. Činná složka se přeměňuje ve spotřebičích na jiný druh energie, jalová je využita pro umožnění transformace, není transformována, ale putuje od zdroje ke spotřebiči a zpět.

Výkonová rovnováha je udržována automaticky na základě kirchhoffových zákonů, členy v rovnici (2) se mění např. vlivem: [16]

- náhodných fluktuací zatížení
- trendových změn souvisejících s tvarem denního diagramu zatížení
- poruchových výpadků bloků
- neregulovatelné dodávky (np. z fotovoltaických elektráren).
- změn dodávek ve zlomech obchodních hodin

Pro udržení výkonové bilance je nutné v elektrizační soustavě provádět regulaci, z rovnice (2) se nabízejí dvě možnosti:

- regulace na straně výroby (regulaci výkonu výroby)
- regulace na straně spotřeby (regulaci změny zatížení)

Proto pro provedení regulace je nutné mít k dispozici:

- dostatečnou hodnotu výkonu
- dostatečné množství regulačního výkonu (nutný pro udržení rovnováhy mezi zatížením a výkony zdrojů)

Jednotlivá zařízení jak na straně výroby i spotřeby musí mít schopnost poskytovat regulační služby, které lze rozdělit následovně:

- Statické regulační služby. Jedná se o plánované výkony. Změny výkonů, které probíhají ve velkém rozsahu při malých rychlostech.
- Dynamické regulační služby. Jsou to neplánované výkony, Změny výkonů, které probíhají v malém rozsahu při velkých rychlostech.

Zařízení, která jsou schopna poskytovat regulační výkon, mají různé schopnosti vyplývající z možnosti: [17]

**a) Rychlost změny výkonu  $v_p$**

$$v_p = \frac{\Delta P}{dt}, \quad v_Q = \frac{\Delta Q}{dt} \quad (3) [17]$$

kde:  $v_p, v_Q$  rychlost změny výkonu (MW / min, MW<sub>r</sub> / min)  
 $\Delta P, \Delta Q$  požadovaná změna výkonu bloku (MW, MW<sub>r</sub>)

Rychlost změny jalového výkonu se u jednotlivých zdrojů příliš neliší.

**b) Regulační pásmo (RP, RQ)**

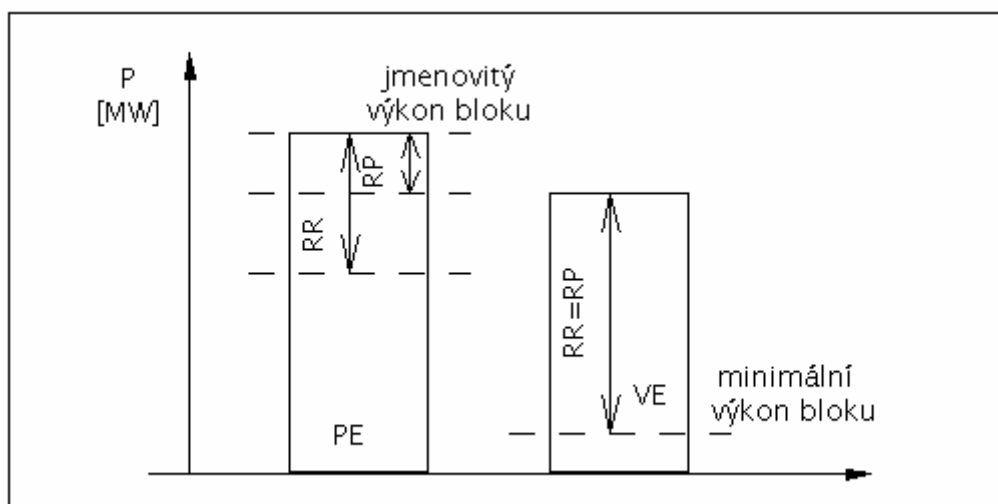
Jedná se o rozsah výkonu, v kterém lze s danou rychlostí změny výkonu regulovat. Tato oblast je zobrazena na Obr. 20

**c) Regulační rozsah (RR)**

Jedná se o rozsah výkonu, v kterém lze měnit výkon i pomalou rychlostí. Viz Obr. 20.

**d) Doba, během které je zařízení schopno dodávat regulační výkon**

Na Obr. 20 je zobrazen regulační rozsah elektrárenského bloku pro parní (PE) a vodní (VE) elektrárnu.



Obr. 20 Regulační rozsah elektrárenského bloku. [17]

## 4.2 Prostředky pro zajištění stability elektrizační soustavy

Podpůrné služby jsou prostředky pro zajištění systémových služeb. Jsou definovány jako činnosti fyzických nebo právnických osob pro zajištění provozování elektrizační soustavy a pro zajištění kvality a spolehlivosti dodávky elektřiny. Pomocí podpůrných služeb je možno korigovat rozdíly mezi odběrem a výrobou, a to změnami spotřeby či výkonů výroby. [11]

### 4.2.1 Primární regulace frekvence bloku

Účelem primární regulace frekvence a výkonu je (podle ČEPS) regulace výkonu elektrárenských bloků při změně frekvence v časovém intervalu do třiceti sekund. V propojené elektrizační soustavě je regulace kmitočtu založena na principu solidarity. Což znamená, že při narušení rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektrické energie se na vyrovnaní výkonové nerovnováhy podílejí všechny zdroje, které jsou do systému primární regulace zapojeny. Jedná se automatickou funkci, která na jednotlivých elektrárenských blocích zajišťuje rychlou změnu výkonu podle odchylky frekvence od požadované hodnoty. Změna výkonu elektrárenského bloku vyžadovaná obvody primární regulace v závislosti na odchylce frekvence je určena vztahem:

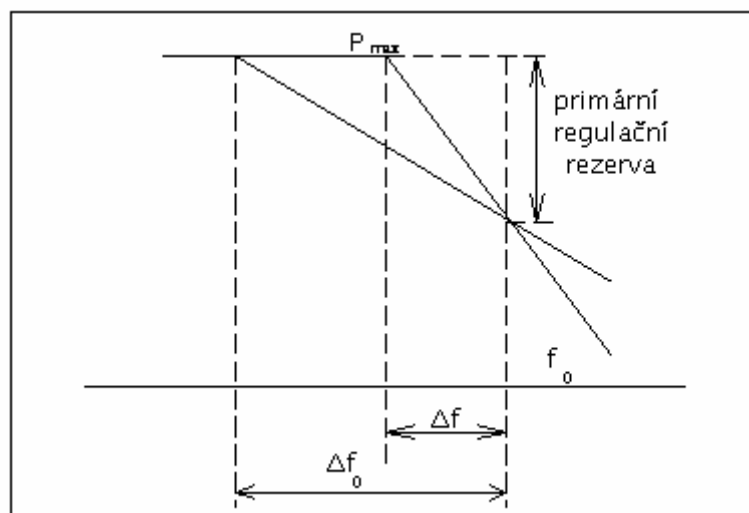
$$\Delta P = \frac{100}{s} \cdot \frac{P_n}{f_n} \cdot \Delta f \quad (4) \quad [19]$$

kde:  $\Delta P$  požadovaná změna výkonu bloku (MW)  
 $P_n$  jmenovitý výkon bloku (MW)  
 $\Delta f$  odchylka frekvence od jmenovité hodnoty (Hz)



- $f_n$  jmenovitá frekvence (Hz)  
 $s$  statika primární regulace (%)

Z předchozího vztahu vyplývá, že velikost požadované změny výkonu bloku v závislosti na odchylce frekvence sítě je určena statikou primární regulace. Pro tuto regulaci je nutné trvale vyčlenit primární regulační zálohu, která závisí na technologických vlastnostech bloku a požadavcích provozovatele přenosové soustavy. Na Obr. 21 je zobrazen princip primární regulace s primární regulační rezervou.



Obr. 21 Primární regulace a primární regulační rezerva.

#### 4.2.2 Sekundární regulace výkonu bloku

Úkolem sekundární regulace je (podle ČEPS) udržovat frekvenci na jmenovité hodnotě a saldo předávaných výkonů se sousedními soustavami na sjednané hodnotě. Sekundární regulace je zajišťována automaticky sekundárním regulátorem frekvence (regulátor je umístěn na dispečinku provozovatele PS) a předávaných výkonů na úrovni příslušné soustavy. Regulátor pracuje podle metody síťových charakteristik. Činnost sekundární regulace má obnovit zadané hodnoty frekvence a předávaných výkonů do 15 min. od vzniku nerovnováhy.

Sekundární regulace navazuje na primární regulaci tak, aby nahradila výkon, který jí byl poskytnut na principu solidarity v propojené soustavě.

Sekundární regulace má tedy dvě základní funkce:

- Při nepatrných odchylkách kmitočtu ( $\Delta f \rightarrow 0$ ) - zajišťuje udržování dohodnutého předávaného výkonu.

- při značných odchylkách kmitočtu (výpadek bloku elektrárny) - sekundární regulace zajišťuje, že rozdělení podle primární regulace různých regulačních oblastí bude udržováno, až do doby, než regulační oblast postižená výpadkem bude obnovena

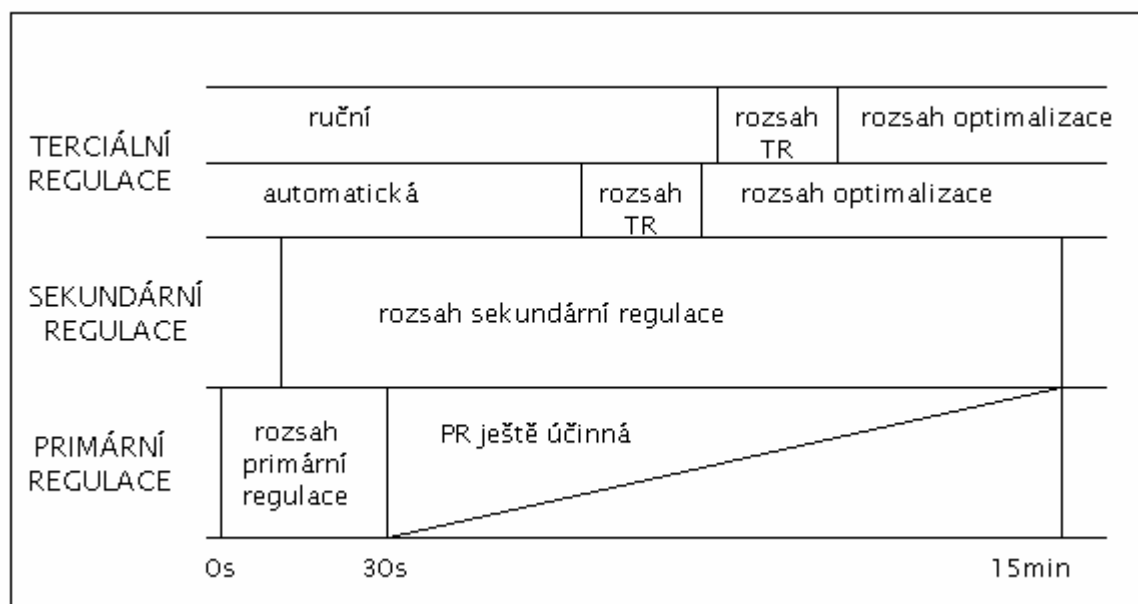
### 4.2.3 Terciární regulace

Terciární regulace je (podle ČEPS) výkon, který může být připojen pro zajištění dostatečné rezervy sekundární regulace automaticky nebo ručně. Úkolem terciární regulace je garantovat dostatečnou přípravu sekundární regulační rezervy jak podle velikosti, tak v potřebném čase. Stará se o optimální rozdělení sekundárního regulačního výkonu na jednotlivé stroje.

Posunutí pracovního bodu může nastat z důvodu:

- Připojení odpojení výkonu
- Přerozdělení výkonu v sekundární regulaci

Na Obr. 22 je zobrazeno porovnání působení jednotlivých regulací.



Obr. 22 Časové oblasti působení jednotlivých regulací.

## 4.3 Požadovaná výše podpůrných služeb v rámci ČR

Požadovaná velikost podpůrných služeb je v každé hodině roku dána požadavky UCTE.

### 4.3.1 Požadovaná výše primární regulační rezervy

Podle UCTE je celková výše primární regulační rezervy 3000 MW. V České republice je koeficient účasti stanoven na 0.02992469 [19], z toho vyplývá povinnost držet pro českou

elektrizační soustavu v každém okamžiku primární regulaci ve výši 90 MW. Vzhledem k potřebě zajištění nejméně hodnoty v každém okamžiku je pro plánovací účely vhodné použít kritérium n-2 (výpadek 2 prvků). Z toho vyplývá požadavek na výši primární regulační rezervy ve výši cca 100-110 MW.[19]

#### 4.3.2 Požadovaná výše sekundární regulační rezervy

Podle doporučení UCTE je minimální celková výše sekundární regulační rezervy stanovena následovně:

$$SR = \pm \sqrt{(a \cdot L_{\max} + b^2)} - b \quad (5) \quad [19]$$

kde:  $a = 10$  empirická konstanta

$b = 150$  empirická konstanta

$L_{\max}$  očekávaný maximální výkon zatížení regulované oblasti (MW)

Požadovaná výše sekundární regulace musí být taková, aby bylo možné s její pomocí pokrýt odchylky zatížení a udržet okamžitou výši neplánovaných výměn s okolními soustavami v pásmu  $\pm 100$  MW a saldo neplánovaných výměn v pásmu 20 MWh v každé hodině. V podmínkách naší elektrizační soustavy potřeba výkonu pro zajištění tohoto požadavku v jednotlivých hodinách osciluje v rozsahu cca 150 až 450 MW.[19]

#### 4.3.3 Požadovaná výše terciální regulační rezervy

Tato rezerva má zajistit spolu s rychle startující výkonovou zálohou pokrytí odchylek zatížení a výpadků bloků s tím, že déletrvající odchylky, ať již vlivem kumulace výpadků, nebo dlouhodobějších klimatických změn budou postupně pokryty najížděním bloků ze studené výkonové zálohy. Výše výkonu, požadovaného v terciální regulaci, byla stanovena na přibližně 3% maximálního očekávaného zatížení. [19]

### 4.4 Prostředky pro omezení nároků na podpůrné služby potřebné pro provoz fotovoltaických elektráren

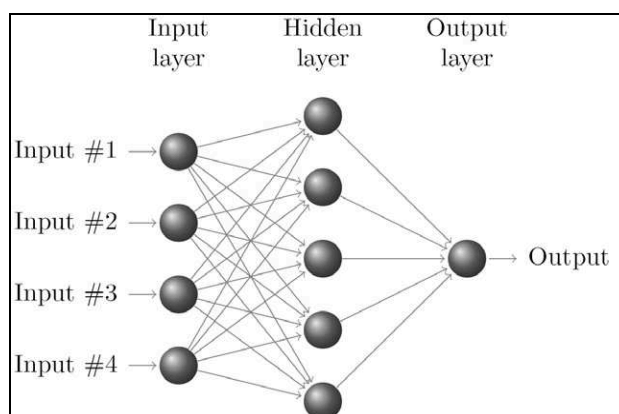
Fotovoltaické elektrárny jsou zdroje s nestabilní dodávkou elektrické energie, která je závislá především na ročním období a okamžitých povětrnostních podmínkách. Nestabilní dodávka musí být kryta výkonem v jiných zdrojích. Pro snížení nároků na dodávku výkonu z rezervních zdrojů se nabízí několik možností.

#### 4.4.1 Predikce výroby elektrické energie z fotovoltaických elektráren

V současnosti existuje několik odlišných přístupů k predikci výroby elektrické energie z fotovoltaických elektráren. Nejčastěji se používá metoda založená na predikci klimatických a meteorologických veličin, od níž se odvíjí výsledné množství vyrobené elektrické energie. Společně s těmito údaji se zpracovávají údaje z lokálních zařízení aktuálních klimatologických veličin a lokálních solárních databází. Z těchto vstupních dat se předikuje očekávanou vyrobenou elektrickou energií ze solárních elektráren.

Další možností predikce výroby elektrické energie z fotovoltaických elektráren je využití vysoce sofistikovaných matematických metod na bázi časových řad, které na základě databáze reálných měření jsou schopny predikovat s určitou přesností objem vyrobené elektrické energie.[2] Schopnost předikovat, s dostatečnou přesností, množství vyrobené elektrické energie je velmi důležitá. Umožní provozovatelům distribučních soustav snížit výkonové rezervy podpůrných služeb, držených pro provoz fotovoltaických zdrojů.

Aktuálně se k predikci výroby elektrické energie začíná hojně využívat i tzv. neuronových sítí. Neuronové sítě jsou sítě, které jsou schopny samy vytvořit logické vazby mezi vstupními a výstupními daty, a s využitím těchto vazeb jsou schopny samostatně pro vstupní data generovat data výstupní. Na Obr. 23 je zobrazen příklad predikce pomocí neuronové sítě.



Obr. 23 Obecný princip neuronových sítí. [2]

Současné predikční systémy pro solární elektrárny, ve většině případů, využívají kombinace jednotlivých postupů. Tím dochází k minimalizaci chyb predikce.

#### Solární databáze

Na území Evropy jsou umístěny stovky meteorologických stanic, kde je měřeno, mnoho dalších meteorologických veličin, sluneční záření ať už přímo nebo nepřímo[2]. Ze změřených hodnot se matematicky odvozují hodnoty slunečního záření pro lokality, ve kterých není prováděno meteorologické měření. Nejčastěji se používá různých interpolačních metod. Nové satelity jako

např. Meteosat 8 poskytuje data o územním rozlišení 1 km x 1 km s frekvencí snímků 15 min. Mezi nejznámější celosvětové databáze patří:

- ESRA (The European Solar Radiation Atlas)
- HelioClim
- Satel – Light
- NASA SSE
- SWERA

#### **4.4.2 Soudobost fotovoltaických elektráren v rámci České republiky**

Zdrojem pro sluneční elektrárny je energie slunečního záření. Proto výkon fotovoltaických elektráren je závislý na východu a západu slunce a také na přechodu frontálních oblačností přes území ČR.

##### **Soudobost z hlediska východu a západu slunce**

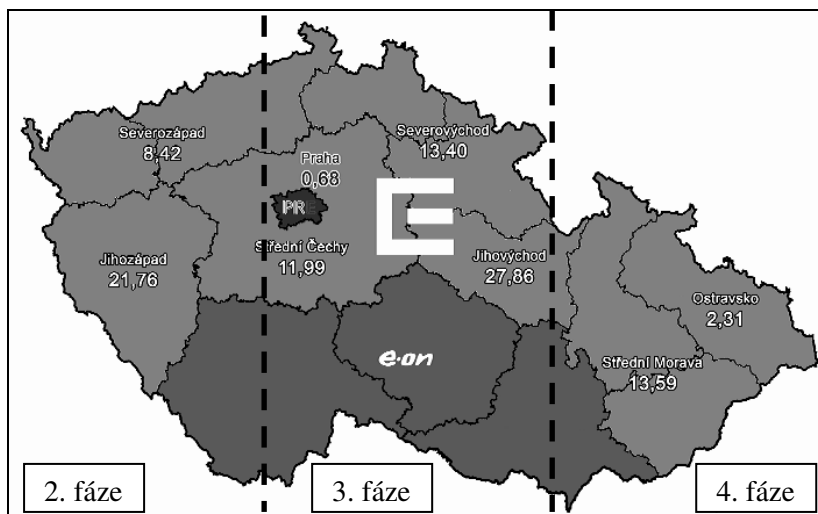
V rámci ČR je rozdíl mezi východem a západem slunce v západní a východní části republiky v řádu desítek minut. V době letního slunovratu se jedná o 23 minut, v době zimního slunovratu se jedná o 30 minut.[21] Tento fakt má za důsledek, že nárůst výkonu jednotlivých fotovoltaických elektráren probíhá odlišně v souvislosti s odlišnou dobou východu slunce. Z důvodu různé doby východu a západu slunce dochází ke snížení negativních vlivů, které doprovází nárůst výkonu slunečních elektráren. Díky menším rozměrům ČR je zpoždění nárůstu a poklesu výkonu v řádech několika minut.

##### **Soudobost z hlediska přechodu frontálních oblačností**

Jde-li frontální oblačnost z východu na západ, dochází v jednotlivých slunečních elektrárnách k poklesu výroby elektrické energie. Přesnost vyčíslení soudobosti přímo souvisí s časovým krokem meteorologických údajů. Řešením tohoto problému by bylo vytvoření sofistikovaného monitorovacího systému, který by sledoval změny výkonu vytípaných fotovoltaických elektráren v závislosti přechodu oblačnosti přes území ČR. Tento monitorovací systém pak může posloužit jako vstup do modelu pro predikci výkonu fotovoltaických elektráren, jehož výsledná data využije provozovatel distribuční soustavy.

Na Obr. 24 (podle [8]) je zobrazen modelový příklad přechodu frontální oblačnosti přes území České republiky. Model je definován pěti fázemi. Dodávaný výkon závisí pouze na hodnotě oblačnosti. První fáze představuje nulovou oblačnost, všechny elektrárny tedy dodávají instalovaný výkon, který je vyobrazen procentuální hodnotou. Ve druhé fázi přichází ze západu oblačnost, která zasáhne pouze 1. oblast. Ve třetí fázi oblačnost zasáhne pouze 2. oblast. Ve čtvrté fázi oblačnost zasáhne pouze 3. oblast. V páté fázi oblačnost opustila území ČR a elektrárny opět dodávají instalovaný výkon. V Tab. 1 jsou zobrazeny hodnoty výkonu z jednotlivých lokalit v dané fázi. Vzhledem k tomu, že není možné zobecnit tvar a rychlost přechodu frontální oblačnosti,

stejně tak, jako směr přechodu oblačnosti, je tento příklad pouze jeden z mnoha možných a slouží k demonstraci vlivu frontální oblačnosti na množství elektrické energie. [8]



Obr. 24 Fáze přechodu frontálních oblačností.

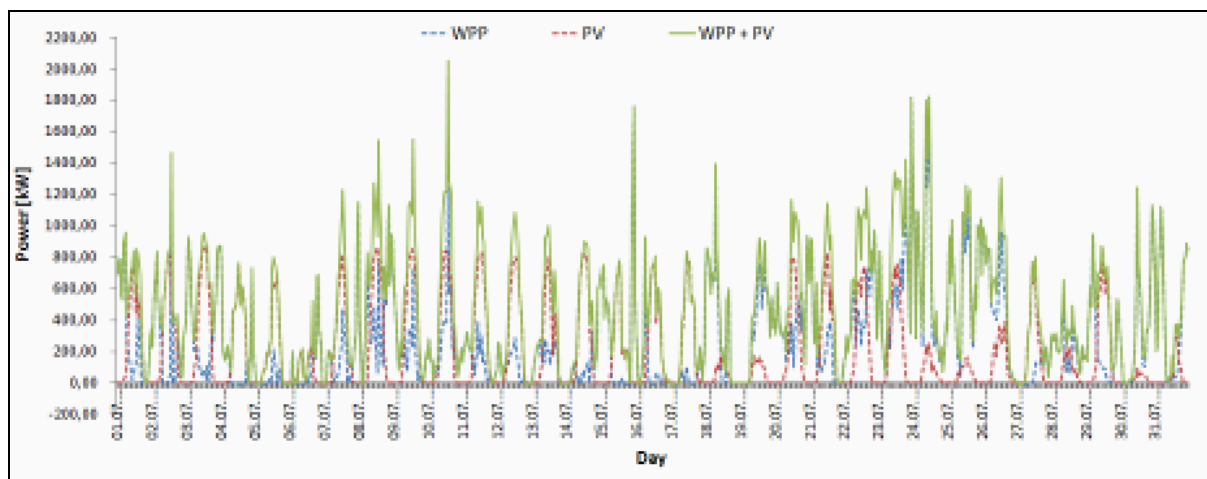
Tab. 1 Přechod frontální oblačnosti přes území ČR

lokalita	1. fáze, 5. fáze	2. fáze	3. fáze	4. fáze
Severozápad	8,42	1,26	8	8,42
Jihozápad	21,76	2,18	18,49	21,76
Střední Čechy	11,99	11,99	11,99	11,99
Praha	0,68	0,59	0,51	0,68
Severovýchod	13,4	13,4	0,67	10,72
Jihovýchod	27,86	27,86	5,57	20,89
Střední morava	13,59	13,59	12,64	0,27
Ostravsko	2,31	2,31	2,26	0,05
ČR	100,00	73,18	60,13	74,78

#### 4.4.3 Spolupráce fotovoltaických a větrných elektráren

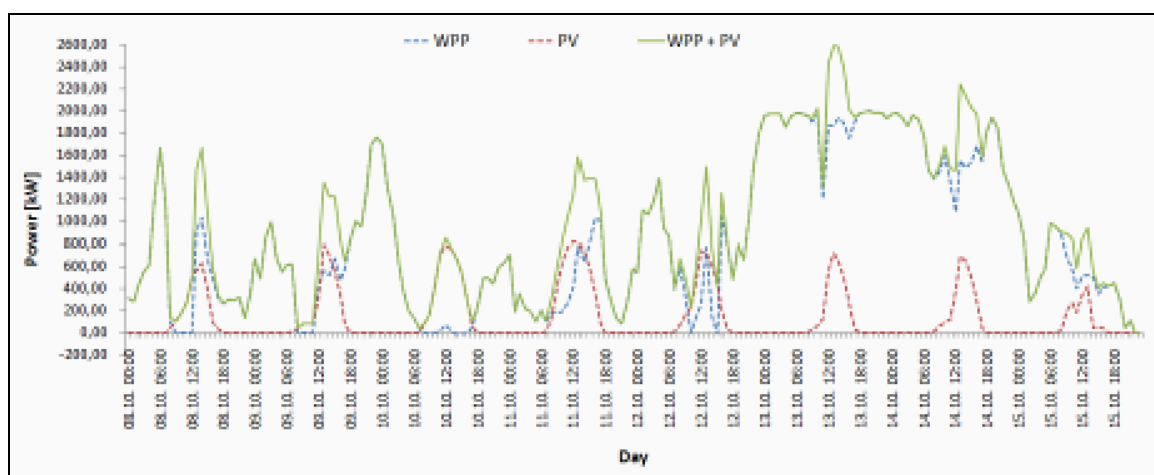
Sluneční elektrárny, stejně jako větrné, mají nestabilní a stochastickou výrobu elektrické energie. Úvahy o jejich spolupráci (viz [9]), jsou proto opodstatněné. Sluneční elektrárna nepracuje v noci a v zimních měsících její výroba klesne na minimum (koeficient využití se pohybuje kolem 5%), naopak v letních měsících v poledních hodinách je schopna dodávat téměř instalovaný výkon. Situace u větrné elektrárny je zcela odlišná. V letních měsících bývá intenzita větru slabší, naopak v podzimních a zimních měsících příznivá. Jejich sloučením lze proto omezit fluktuaci dodávaného výkonu a tím snížit nároky na výkonové rezervy.

Na následujících grafech je provedeno sloučení sluneční a větrné elektrárny na skutečné síti. Na Obr. 25 je zobrazen okamžitý výkon v hodinových intervalech v měsíci červenci. Využití koeficientu větrné elektrárny je v červenci v průměru 14% a koeficient využití solární elektrárny byla v průměru 18%.



Obr. 25 Průběh okamžitého výkonu WPP, PV a WPP + PV v červenci. [9]

Na Obr. 25 je zobrazen dodávaný výkon vybraných dnů v měsíci říjnu. Z grafu je patrné, že výkon dodávaný větrnou elektrárnou se zvýšil. Koeficient využití dosáhl hodnoty 25%, oproti tomu koeficient sluneční elektrárny klesl na 9%. Z křivky je patrné, že většinu výkonu dodává větrná elektrárna.



Obr. 26 Průběh okamžitého výkonu WPP, PV a WPP + PV v období od 8. 10. do 15. 10. [9]

Z předchozích grafů je patrné, že změny výkonu jsou nižší, než v případě zapojení samostatných zdrojů. [9]

#### 4.4.4 Řízení spotřeby elektrické energie podle její výroby

Problematiku stability elektrizační soustavy při vyšším podílu neregulujících zdrojů zlepšuje řízení spotřeby elektrické energie podle její výroby. Jeden z už osvědčených systémů se nazývá hromadné dálkové ovládání. V současnosti jsou často diskutovány tématem Smart Grids, do češtiny volně překládané jako „chytré (inteligentní) síť“.

### **HDO**

Jedná se o systém pro dálkové spínání především tepelných elektrospotřebičů, pro odlehčení (větší zatížení) sítě podle potřeby provozovatele distribuční soustavy. S jeho pomocí dochází ke snižování odchylky mezi aktuální výrobou a spotřebou elektrické energie. Tento systém snižuje nároky na kapacity elektráren a přenosovou schopnost vedení tím, že přesune provoz vybraných zařízení do doby nízkého zatížení elektrizační soustavy. Tento systém nachází kromě domácnosti uplatnění i v průmyslu, využívá se pro ovládání veřejného osvětlení, a podobně. Výhodou HDO je možnost přenosu informace využitím stávajícího silového vedení.

### **Smart Grids**

Smart grids jsou inteligentní, automaticky se regulující silové elektrické a komunikační sítě, které umožňují regulovat výrobu a spotřebu elektrické energie v reálném čase, jak v místním, tak v globálním měřítku. Obsahují digitální kontrolní a řídicí systém, integrované senzory monitorující chování sítě a automatické obnovování provozu po poruše. Zaznamenávají informace o zatížení sítě, kvalitě dodávky, přerušení v reálném čase. Podstatou těchto sítí je vybavení zákazníků digitálními měřidly s obousměrným tokem informací, které vytvářejí cenu tarifů podle aktuální situace v síti. Uživatel nastaví svůj Smart metr tak, aby zapnul vybrané spotřebiče v době, kdy je poptávka po výkonu nejmenší. V době, kdy je výkon nejvíc potřeba, zůstanou tyto spotřebiče odstaveny. Takto řízená spotřeba větší možnosti pro rozšíření zdrojů s nestabilní dodávkou elektrické energie, kterým fotovoltaika bezesporu je.

V sítích Smart Grids už se nepočítá se současným konceptem: výroba, přenos, distribuce a spotřeba elektrické energie. Dochází k vytvoření nového konceptu, ve kterém se využívá principu počítačové sítě. Jednotlivé části jsou navzájem propojeny a výpadek jedné části bude nahrazen dodávkou z jiné části. V těchto sítích se počítá s širším zastoupením obnovitelných zdrojů, tedy i fotovoltaických elektráren.

## **4.5 Akumulace elektrické energie**

Akumulace energie je důležitou součástí problematiky nekonvenčních zdrojů energie. Nevýhodou nejen velkých slunečních elektráren je velmi omezená možnost regulace výkonu. Handicapem využívání solární energie je nerovnoměrnost slunečního svitu. Částečně mohou tyto výkyvy vyrovnávat vodní elektrárny anebo již zmiňované chytré sítě. Jako zajímavou alternativou odstranění nestabilních dodávek elektrické energie do elektrizační soustavy, se jeví akumulací systémy. V době přebytku energie by docházelo k její akumulaci pro pozdější využití v době jejího nedostatku. Tímto způsobem je možné vyrovnávat rozdíly mezi špičkovým a mimošpičkovým odběrem a vykrývat energetické špičky v distribuční síti.

Existuje mnoho způsobů akumulace elektrické energie. Jedná se o její přeměnu na jinou formu, ve které může být efektivněji uskladněna a v případě potřeby znovu přeměněna na energii



elektrickou. Na systémy akumulace elektrické energie je kladena řada požadavků. Mezi nejdůležitější patří:

- Velikost a kapacita, respektive hustota energie (kWh / kg)
- Maximální výkon, jak rychle dokáže energii uvolnit.
- Doba, po kterou může energii uchovat a kolik energie si při tom zachová
- Účinnost a její případný pokles s časem
- Investiční náklady a cena za akumulovanou kWh
- Počet cyklů, životnost

#### **Elektrochemické akumulátory**

Elektrochemické akumulátory akumulují energii ve formě chemické energie. Jejich technologie výroby je dobře zvládnutá. Nabízejí možnost mnohonásobného opětovného nabíjení, široké spektrum použití a relativně nízkou cenu. Nevýhodou je samovybíjení a citlivost na hluboké vybíjení, které vyvolává nevratné změny na elektrodách s následkem snižování kapacity akumulátoru. Rovněž poměr akumulované energie ke hmotnosti akumulátoru není příliš výhodný.

Elektrické napětí elektrochemických článků se pohybuje v rozmezí 1,1 V až 2 V, v závislosti na typu akumulátorů. Proto se běžně pro technické účely využívají akumulátory baterie sestavené pomocí sériově spojených akumulátorů. Většina akumulátorů je schopna opětovného provozu ve stovkách až tisících cyklů. [18]

- Olověný akumulátor – nejběžnější akumulátor, jeho nevýhoda je relativně malá hustota energie a poměrně vysoká cena olova.
- Li-ion akumulátor – lehký kov, díky jeho vysoké reaktivitě mají lithiové články relativně vysoké napětí (3,7V). Jeho nevýhoda je vysoká cena, nižší životnost a citlivé podmínky na nabíjení a vybíjení.
- NaS akumulátor – výhodou je vysoká energetická hustota, účinnost kolem 80%, téměř nepodléhají samovybíjení, jejich životnost je 15 let a snesou velký počet cyklů
- Zn-Br akumulátor – tento druh akumulátoru má velký počet cyklů a lze jej bez poškození vybít ze 100 %. [18]

#### **Akumulace energie v superkapacitorech**

Energie v superkapacitorech je akumulována do elektrického pole nabitého kondenzátoru. V současných typech elektrolytů je napětí jednoho článku zhruba 2,5 V. Pro akumulaci energie při vyšším napětím lze články řadit sériově. Typická vlastnost superkapacitorů je jejich malý sériový vnitřní odpor, jsou tedy vhodné pro rychlé dodávky i odběr energie. Výhodou superkapacitorů je vysoká účinnost akumulace která dosahuje až 95 %. Nevýhodou je závislost napětí na uloženém náboji. Tento problém lze minimalizovat použitím napěťových měničů. Další nevýhodou je aktuálně poměrně vysoká cena. Superkapacity se jeví vhodné pro použití v oblasti fotovoltiky, především jako vyrovnávací akumulátory elektrické energie pro menší systémy spojené se sítí, kde mohou kompenzovat krátkodobé výkyvy výkonu.[18]

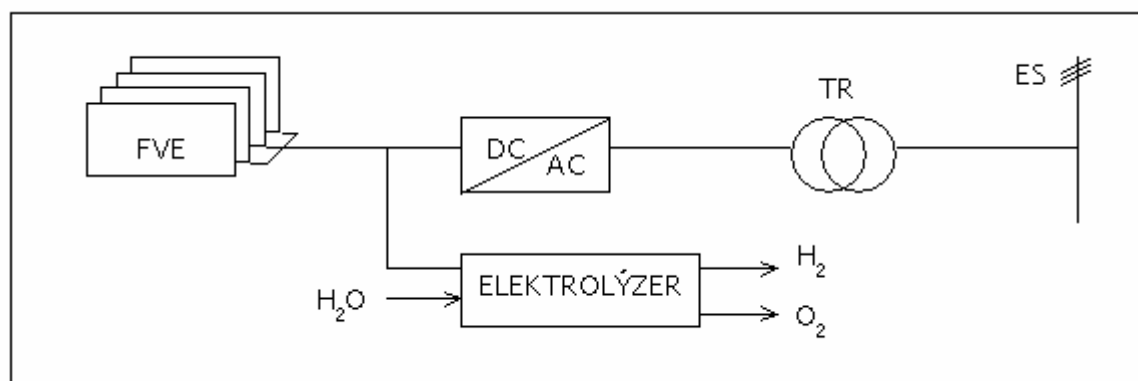
### Akumulace energie v přečerpávacích elektrárnách

Další možnost akumulace energie je pomocí přečerpávacích elektráren. Přečerpávací elektrárna se skládá ze dvou nádrží, přičemž jedna je umístěna výše než druhá, propojených potrubím s reverzní turbínou. V době přebytku elektrické energie dochází k čerpání do horní nádrže, čímž voda zvyšuje svou potenciální energii. V době nedostatku energie může voda nahromaděnou energii předávat turbíně a s ní spojenému generátoru. Tímto způsobem lze vyrovnat nerovnoměrný odběr energie z rozvodné sítě. Vodní elektrárna je schopna najet na plný výkon do dvou minut. V České republice se nacházejí tři velké přečerpávací elektrárny ČEZ a stavba dalších je plánována.

### Vodíkové hospodářství pro akumulaci energie

Podstatou je využití elektrické energie k výrobě vodíku elektrolýzou vody a poté jeho jímání a skladování pro pozdější použití. Ke skladování vodíku jsou určeny speciální tlakové zásobníky, které jsou vyrobené z materiálů nereagujících s vodíkem. Energie akumulovaná do vodíku může být přeměněna na elektrickou energii v palivových článcích řízenou elektrochemickou reakcí – tzv. studenou oxidací vodíku neboli studeným spalováním. Zkapalněný vodík se používá jako palivo pro raketové motory. Používá se taky jako palivo do spalovacích motorů, ale takové motory musí být k tomu účelu zvláště konstruovány. Vyrábějí se už automobily i autobusy na vodík i čerpací stanice pro ně určené.

V současnosti se výroba vodíku nabízí jako možnost využití přebytečného výkonu solárních fotovoltaických systémů. Akumulace energie z těchto zdrojů do výroby vodíku je zvláště perspektivní, neboť tak by nerovnoměrnost jimi dodávaného výkonu nečinila problémy v rozvodné síti. Na Obr. 27 je zobrazeno schéma možného připojení systému s fotovoltaickým zdrojem energie k síti. Část produkované elektrické energie z fotovoltaické elektrárny je dodávána, přes střídač a transformátor, do distribuční sítě a část energie je využita na výrobu vodíku z vody v elektrolýzě.



Obr. 27 Blokové schéma fotovoltaického systému s výrobou vodíku.

## 5 Analýza měření činného výkonu vytypované fotovoltaické elektrárny

### 5.1 Popis analyzované elektrárny

K dlouhodobému měření a následným analýzám byla vybrána fotovoltaická elektrárna umístěna poblíž obce Starojická Lhota v Moravskoslezském kraji. Instalovaný výkon elektrárny je 1100 kWp. Elektrárna byla uvedena do provozu 1. 6. 2010.

Technické parametry FVE:

- Jmenovitý výkon: 1,1 MWp
- Špičkový výkon: 1,1 MWp
- Lokalita: Moravskoslezský kraj



Obr. 28 FVE Starojická Lhota. [32]

Jedná se o elektrárnu sestavenou s monokrystalických panelů typu FCP-210. Celkem je použito 5304 panelů. Podle normy EN 61215 dosahuje účinnost panelů hodnoty 17,7%, s garancí výkonu 80% po dobu 25 let provozu. Technické parametry použitých panelů jsou v Tab. 2

Tab. 2 Technické parametry použitých panelů

Parametr	Hodnota	Jednotka
maximální výkon	210	W
výstupní tolerance	$\pm 5$	%
proud při $P_{\max}$	9	A
napětí při $P_{\max}$	23,4	V
proud naprázdno	10,5	A
napětí naprázdno	26,4	V
maximální napětí systému	1000	V

### 5.1.1 Měníč KACO 3000xi

Ke změnám napětí jsou použity měniče KACO 3000xi, založené na beztransformátorové technologii. Maximální proudovou výtěžnost zajišťuje nezávislý sledovač MPP-Tracker, který je propojen se stejnosměrnými vstupy. Úkolem nezávislého sledovače je regulovat pracovní stav dle voltampérové charakteristiky použitých panelů tak, aby bylo dosaženo maximální účinnosti. Inventor a řídicí logika hlídají aby fotovoltaický panel pracoval co nejdelší dobu v maximálním pracovním bodě s maximálním výkonem. Maximální pracovní bod se ve voltampérové charakteristice nachází v místě, kde platí, že  $dP/dV = 0$  [7]. V Tab. 3 jsou zobrazeny vybrané parametry inventorů.

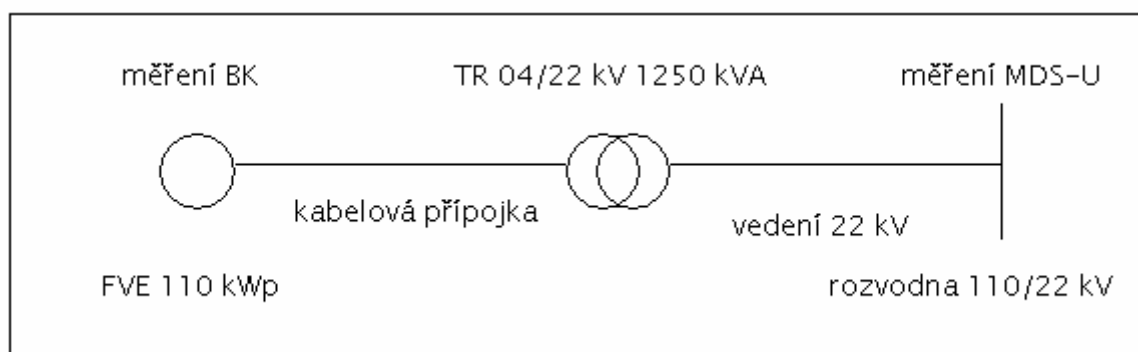
**Tab. 3 Elektrické parametry střídače.**

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon PV generátoru max.	37000	W
Oblast MPP	350 – 600	V
Volnoběžné napětí	800	V
Vstupní proud max.	3 x 32,8	A
Počet MPP regulátorů	3	-
Jmenovitý výkon	29900	W
Výkon max.	32900	W
Síťové napětí	190 – 264	V
Jmenovitý proud	43,3	A
Proud max.	47,7	A
Jmenovitá frekvence	50	HZ
Cos φ	1	-
Počet napájecích fází	3	-
Činitel zkreslení při jmenovitém výkonu	<3	%

### 5.1.2 Připojení elektrárny k distribuční síti

Elektrárna je připojena do rozvodny 22/110 kV v Novém Jičíně, přes kompaktní trafostanici 0,4/22 kV s transformátorem o výkonu 1250 kVA. Zjednodušené schéma zapojení elektrárny do elektrizační sítě je zobrazeno na Obr. 29.

Připojení k síti ČEZ se uskutečňuje pomocí výkonového odpínače se zhášecí komorou Dribo Fla.

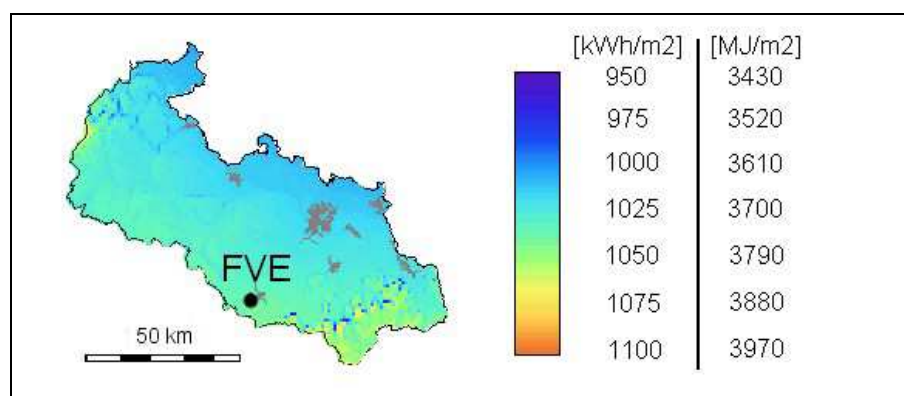


Obr. 29 Zjednodušené schéma připojení FVE.

### 5.1.3 Hodnocení lokality

Základní podmínkou pro správné umístění fotovoltaické elektrárny je zvolení lokality s vhodnými meteorologickými podmínkami, především energie slunečního záření, dále pak teplotou v dané lokalitě a také rychlost větru. Před výstavbou sluneční elektrárny je proto vhodné získat potřebné údaje, buď měřením zmíněných parametrů nebo vycházet z meteorologických databází, kde ovšem musíme počítat s určitou chybou úměrnou vzdálenosti měřicí stanice od místa plánované výstavby.

Pro posouzení vybrané lokality jsou použity informace z meteorologické databáze Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), pro danou lokalitu. Roční průměrná celková denní suma energie slunečního záření na  $\text{m}^2$  přijatá panely ( $H_d$ ) je  $3,2 \text{ kWh/m}^2$  a roční průměrná měsíční suma energie slunečního záření na  $\text{m}^2$  přijatá panely sledovaného systému ( $H_m$ ) je rovná  $97,4 \text{ kWh/m}^2$ . Elektrárna o výkonu  $1100 \text{ kWp}$  pracující v této lokalitě je schopna vyprodukovat denně (roční průměr)  $2840 \text{ kWh}$  elektrické energie. To znamená průměrnou měsíční produkci  $86500 \text{ kWh}$  elektrické energie. Na Obr. 30 (zdroj RES) je zobrazeno umístění elektrárny na solární mapě.



Obr. 30 Průměrný roční úhrn globálního záření v Moravskoslezském kraji.

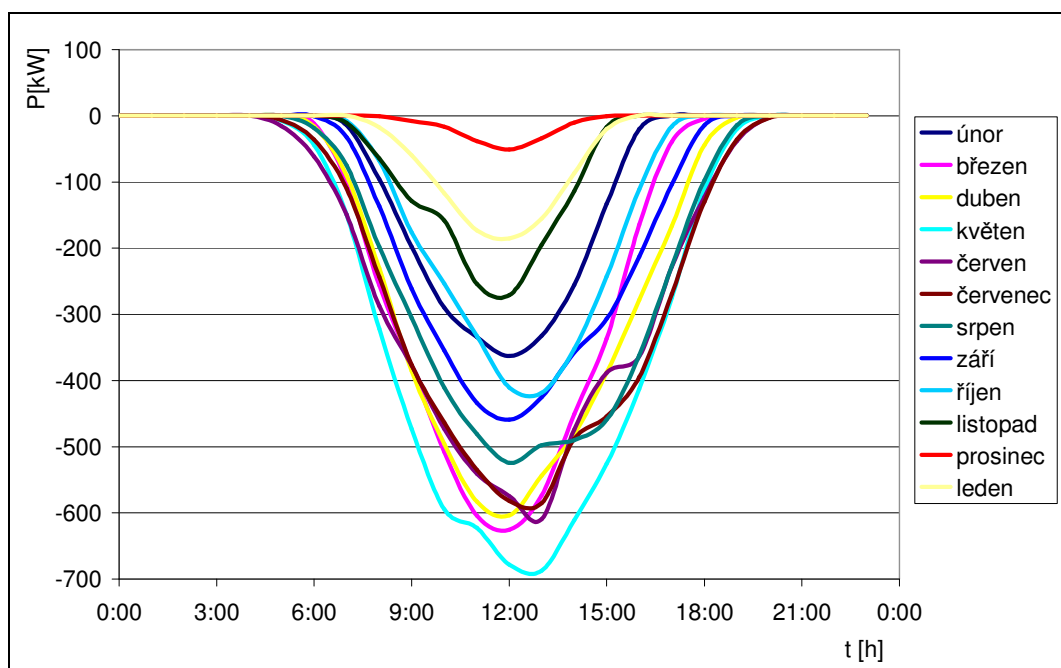
## 5.2 Roční závislost

K hodnocení provozu vybrané fotovoltaické elektrárny byly použity data z ročního měření okamžitých minutových činných i jalových výkonů elektrárny ve Starojické Lhotě. Zpracována data jsou z období od 1. července 2010 do 31. června 2011.

### 5.2.1 Dodávaný okamžitý činný výkon

Na Obr. 31 je zobrazen graf nárůstu okamžitého činného výkonu dodávaného solární elektrárnou do elektrizační soustavy, v závislosti na čase v období od 1. 7. 2010 do 31. 6. 2011. Největší výkon byl dosažen v letních měsících, kdy se v poledních hodinách rovnal kolem 600 kW. Jedná se o typickou křivku fotovoltaických elektráren, kdy v poledních hodinách dosahují nejvyššího výkonu. Maximální dosažený okamžitý činný výkon, téměř 700 kW, byl v květnu. Naopak v prosinci byla hodnota okamžitého činného výkonu zanedbatelná, pod hodnotou 100 kW.

K výpočtům průměrného výkonu byl použit aritmetický průměr, z toho důvodu jsou křivky méně zvlněné. Další možností je zvolit medián.



Obr. 31 Křivky činného výkonu za 24 hodin pro jeden rok.

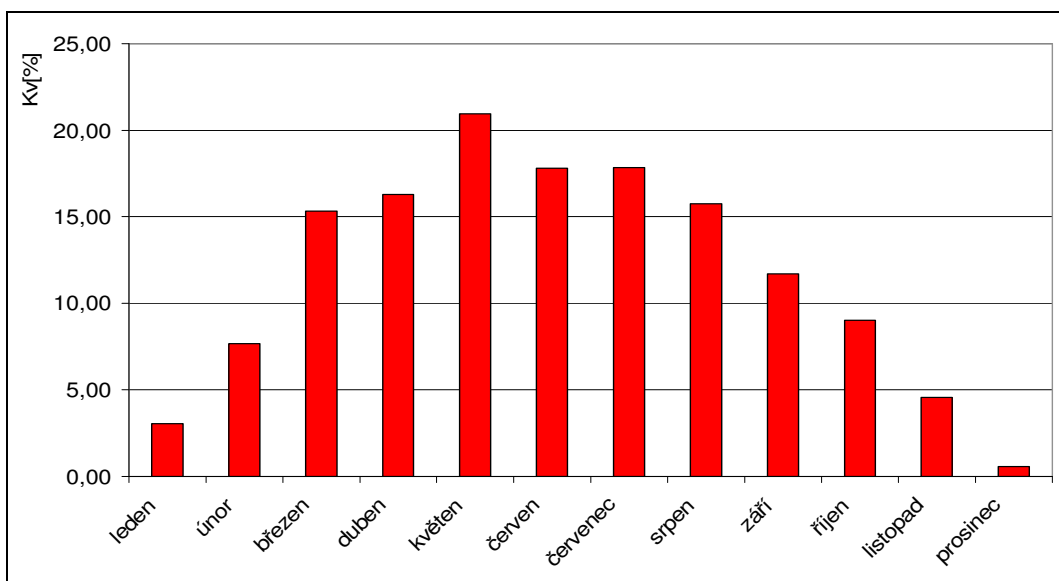
### 5.2.2 Koefficient využití

Fotovoltaická elektrárna Starojická Lhota byla monitorována dlouhodobě. Pro zpracování této analýzy jsou použity data nashromážděné v období mezi 1. červencem 2010 a 31. červnem 2011. V daném období elektrárna dodala do sítě téměř 1,131 GWh elektrické energie. Největší dodávka byla podle očekávání v měsících květen červen a červenec. Roční koefficient využití této výroby dosáhl 11,71 %. V letních měsících se pohyboval kolem 20 %, ale v prosinci, nepřekročil ani hodnotu 1 %. Podrobnější výsledky pro jednotlivé měsíce, doplněné o maximální a minimální množství dodané energie, jsou zobrazeny v Tab. 4

Tab. 4 Roční výroba elektrické energie z FVE Staročeská Lhota

sledované období		množství elektrické energie			koefficient využití
měsíc	rok	minimální	maximální	dodané	
		(kWh)	(kWh)	(kWh/měsíc)	(%)
červenec	2010	-0,71	633,31	145987,37	17,84
srpen	2010	-0,69	639,34	128803,60	15,74
září	2010	-0,66	546,79	92763,45	11,71
říjen	2010	-0,70	497,73	73846,74	9,02
listopad	2010	-0,87	312,53	36097,66	4,56
prosinec	2010	-1,00	60,09	4565,07	0,56
leden	2011	-0,82	235,03	24929,68	0,78
únor	2011	-0,82	404,53	56721,88	7,67
březen	2011	-0,73	663,02	125388,84	15,32
duben	2011	-0,66	692,84	129084,51	16,30
květen	2011	-0,88	761,82	171420,43	20,95
červen	2011	-0,69	698,94	141026,24	17,81
celkem	2010/2011			1130635,46	11,71

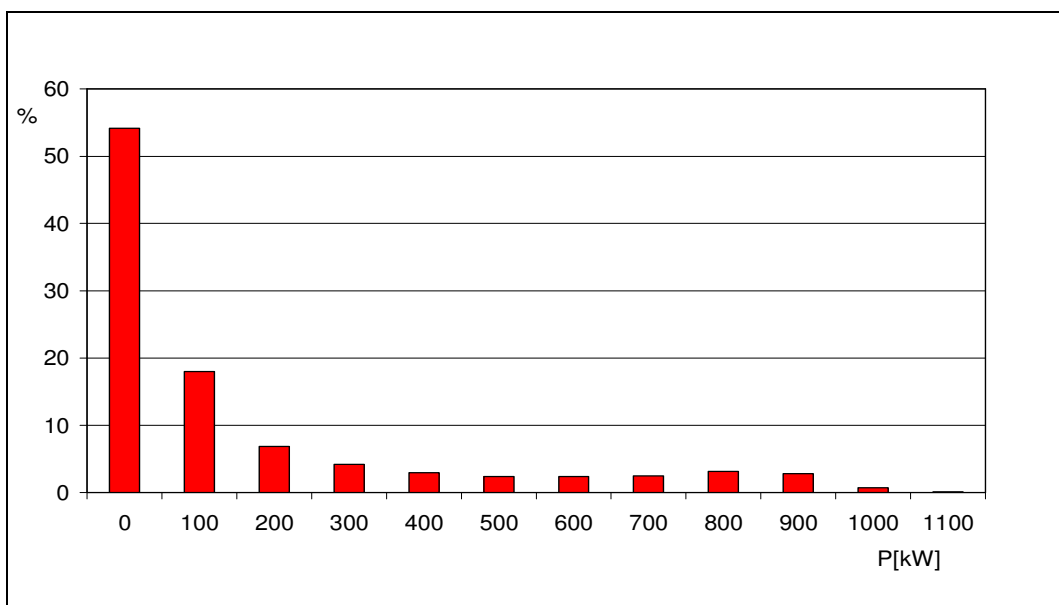
V dobrých slunečních podmínkách se denní koefficient využití blíží k hodnotě 30 %. Největší dosažená hodnota byla 7. května, jednalo se o 28,33 %. V ten den vyrobila elektrárna necelých 7,48 MWh elektrické energie. Na Obr. 32 je zobrazen sloupcový graf, který zobrazuje celkový měsíční koefficient využití pro sledovanou elektrárnu ve sledovaném období jednoho roku.



Obr. 32 Koefficient využití.

### 5.2.3 Histogram četnosti dodávaného okamžitého činného výkonu

Na Obr. 33 je zobrazen histogram četnosti jednotlivých hodnot z fotovoltaické elektrárny, ve sledovaném období o rozsahu jednoho roku. Z grafu je zřejmé, že s rostoucí velikostí výkonu klesá četnost výskytu těchto hodnot. Sloupec s označením 0 na vodorovné ose znamená odběr elektrické energie ze sítě pro vlastní spotřebu. Sloupec pro hodnotu 100 kW obsahuje výkony v intervalu od 0 kW do 100 kW.



Obr. 33 Četnost výkonů.

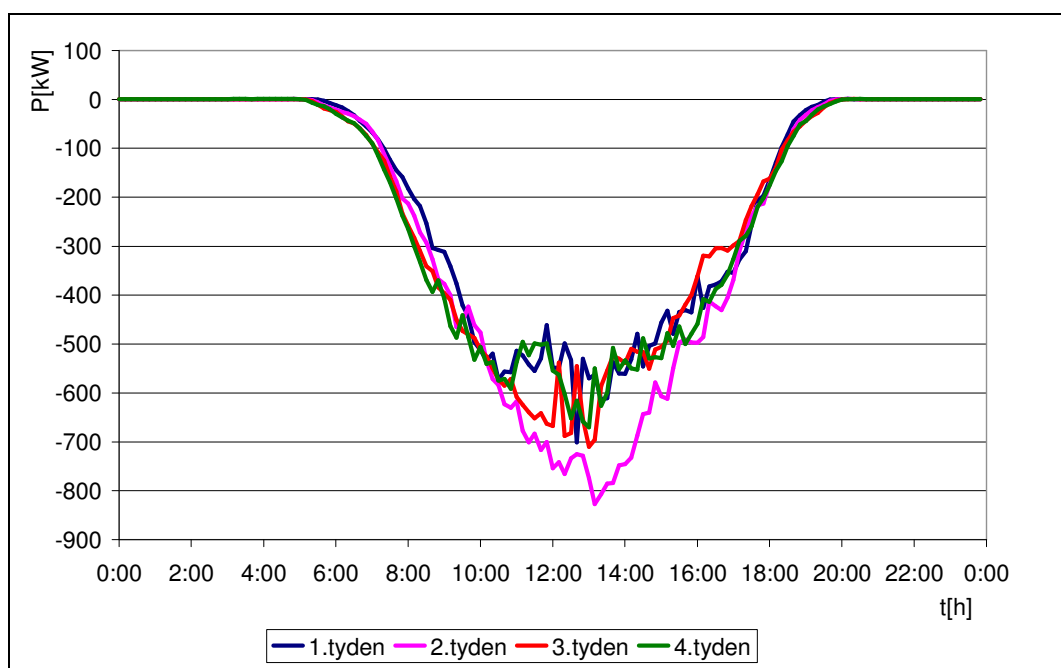


### 5.3 Měsíční závislost

V následující části je analyzováno měření dodávaného výkonu v rámci vybraných měsíců.

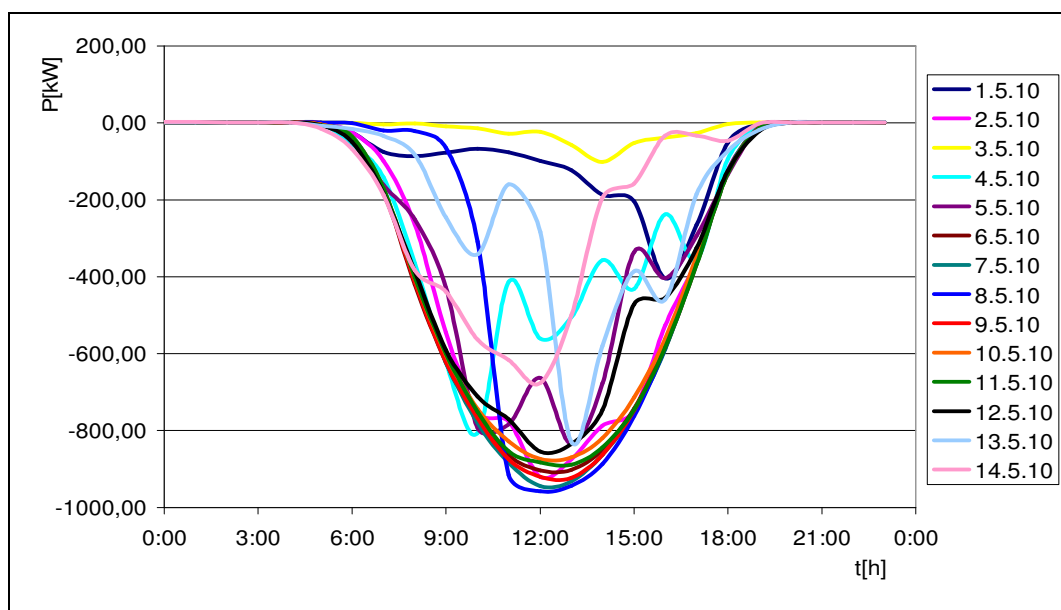
#### 5.3.1 Dodávaný okamžitý činný výkon

Jak již bylo řečeno, největší okamžitý činný výkon dodávala elektrárna v letních měsících. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo v květnu. Na následujícím grafu na Obr. 34 jsou zobrazeny průměrné křivky výkonu elektrárny v měsíci květnu rozděleny na jednotlivé týdny. V prvním, třetím a čtvrtém týdnu jsou výsledné křivky srovnatelné, kdy v poledních hodinách se hodnota výkonu pohybuje v rozmezí 500 kW – 700 kW. Největších výkonů byly získány v druhém týdnu, kdy hodnota dodávaného výkonu překročila kolem 13 hodiny hodnotu 800 kW.



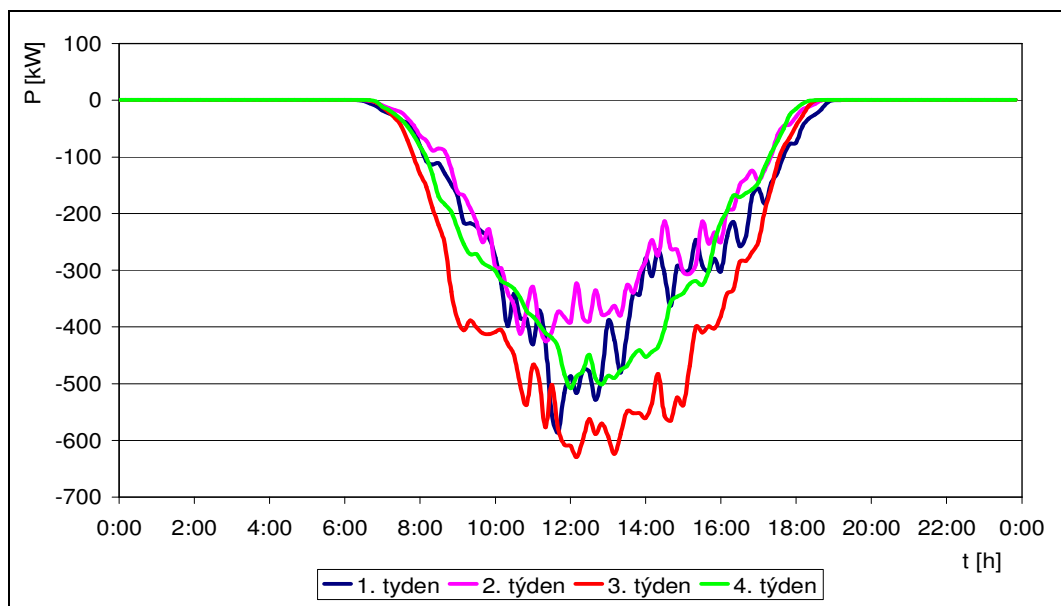
Obr. 34 Týdenní průměrné křivky denního výkonu FVE pro měsíc květen.

Na následujícím grafu, Obr. 35, jsou zobrazeny křivky okamžitého činného výkonu pro jednotlivé dny prvních dvou týdnů měsíce května. Jednalo se o meteorologicky výhodné podmínky, proto ve většině případů, se v poledních hodinách, dodávaný výkon blížil hodnotě 1000 kW. Pouze prvního a třetího května elektrárna vyráběla pouze zanedbatelné množství elektrické energie.



Obr. 35 Denní nárůst činného výkonu pro vybrané dny měsíce května.

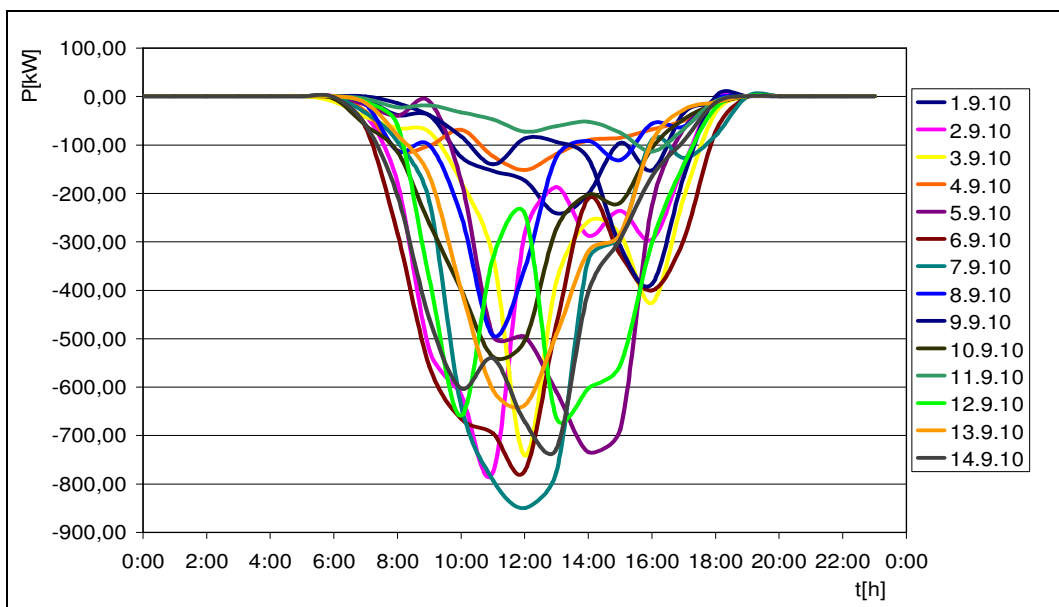
Na následujícím grafu na Obr. 36 jsou zobrazeny průměrné křivky výkonu elektrárny v měsíci září rozděleny na jednotlivé týdny. Největší výkon dodávala elektrárna ve třetím týdnu, v poledních hodinách špičkový výkon přesáhl hodnotu 600 kW. Ve druhém a čtvrtém týdnu dodávala elektrárna v poledních hodinách výkon roven přibližně 500 kW. Nejnížší dodávka výkonu byla v prvním týdnu, kdy elektrárna v poledních hodinách dodávala výkon mezi 300 kW – 400 kW.



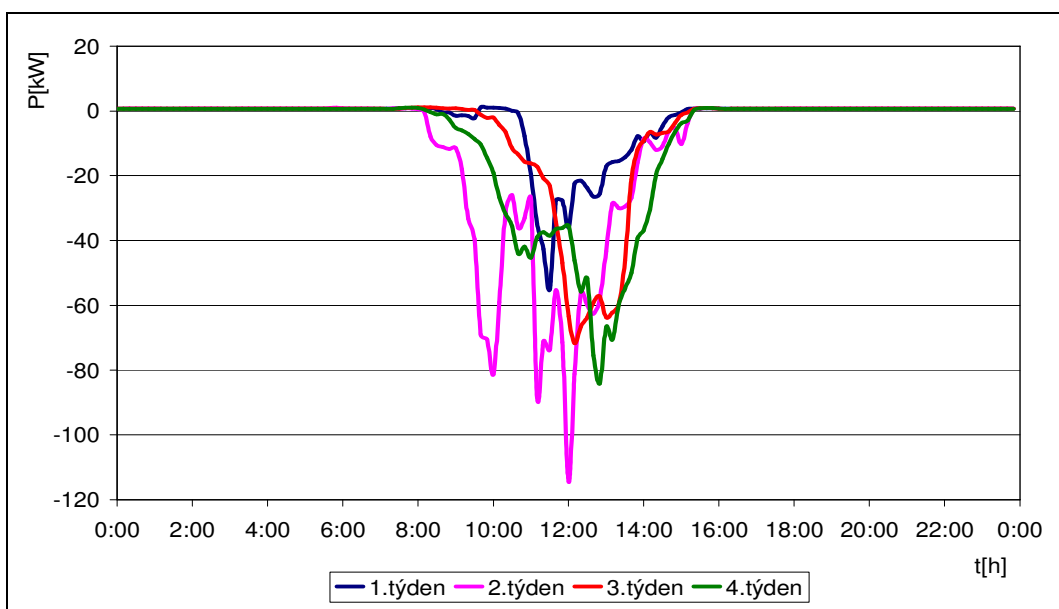
Obr. 36 Týdenní průměrné křivky denního činného výkonu FVE pro měsíc září.

## 5. Analýza měření činného výkonu vytypované fotovoltaické elektrárny

Na následujícím grafu, Obr. 37, jsou zobrazeny křivky okamžitého činného výkonu pro jednotlivé dny prvních dvou týdnů měsíce září. V tomto měsíci byly meteorologické podmínky nepravidelné, a tomu odpovídal i dodávaný výkon z elektrárny, který se v poledních hodinách pohyboval v rozmezí 300 kW - 800 kW. Nejvyšší hodnota výkonu 850 kW byla dodána kolem dvanácté hodiny 8. září



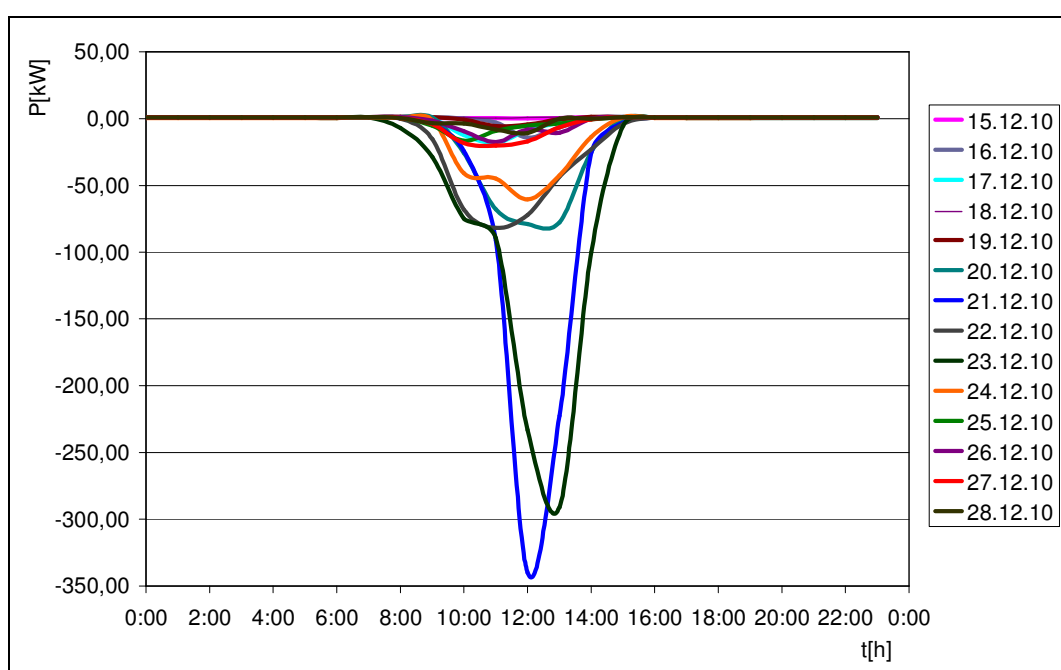
Obr. 37 Denní průběh výkonu pro vybrané dny měsíce září.



Obr. 38 Týdenní průměrné křivky denního výkonu FVE pro měsíc prosinec.

Na Obr. 38 jsou zobrazeny průměrné křivky okamžitého činného výkonu elektrárny v měsíci prosinci rozděleny na jednotlivé týdny. V zimních měsících jsou podmínky pro výrobu elektrické energie špatné. Ve sledovaném období byl prosinec měsíc s nejmenší dodávkou elektrické energie. Z grafu je patrné, že výkonové dodávky jsou v tomto měsíci nepatrné. V poledních hodinách kolísá dodávka výkonu mezi 20 kW – 80 kW, což je vzhledem k instalovanému výkonu 1100 kW, téměř nepatrné číslo.

Na následujícím grafu, Obr. 39, jsou zobrazeny křivky výkonu pro jednotlivé dny dvou týdnů měsíce prosince v období od 15.12 do 28.12. Z grafu je patrné, že pouze dva dny byla elektrárna schopná dodávat v poledních hodinách 300 kW respektive 350 kW. Ve čtyřech dnech byla dodávka v rozmezí 50 kW – 100 kW. Zbytek měsíce byl pro tuto fotovoltaickou elektrárnu z hlediska výroby elektrické energie zanedbatelný.

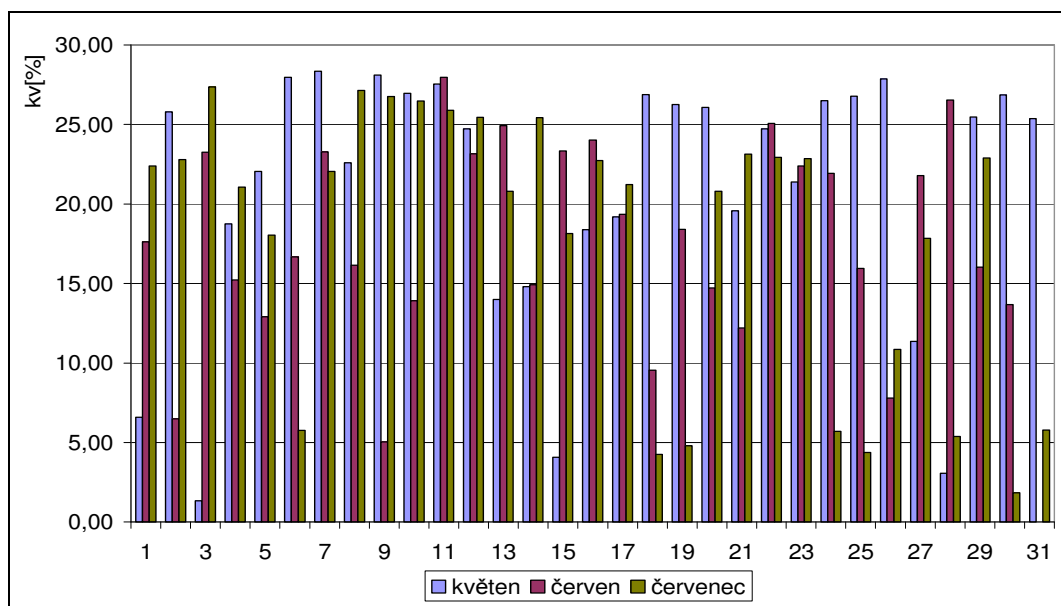


Obr. 39 Denní nárůst výkonu pro vybrané dny měsíce prosinec.

### 5.3.2 Koeficient využití

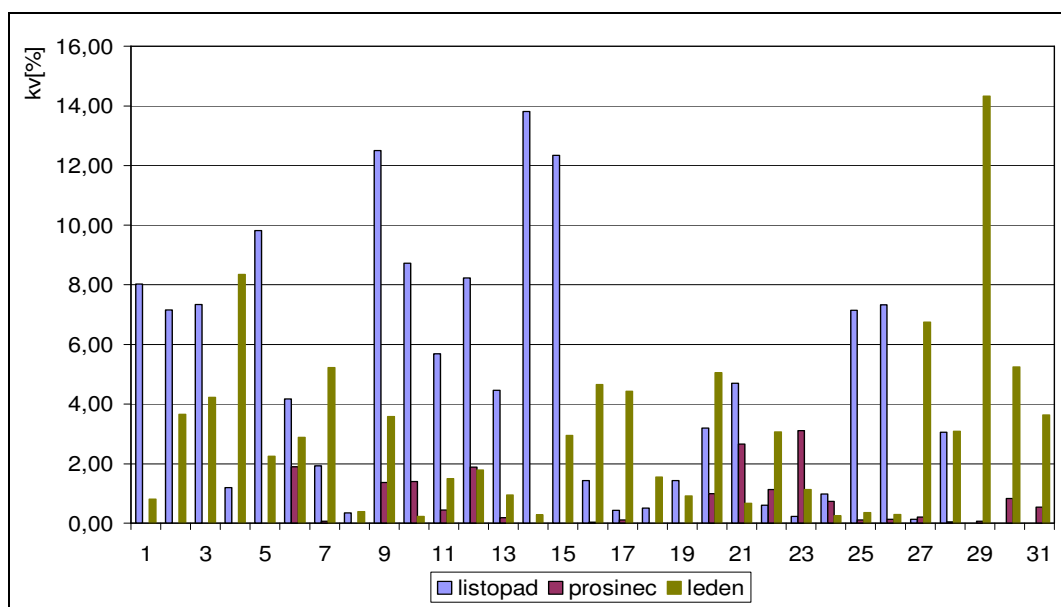
Z předcházející kapitoly vyplývá, že roční koeficient využití měřené elektrárny je 11,71 %. Následující část je podrobněji zaměřena na vybrané části roku.

V grafu na Obr. 40 jsou zobrazeny denní koeficienty využití sluneční elektrárny pro měsíce s nejlepšími meteorologickými podmínkami. Jedná se o měsíce květen, červen a červenec. Jak je z grafu zřejmé, ve většině případů se koeficient využití pohybuje v rozmezí 20 % až 25 %.



Obr. 40 Denní koeficient využití pro meteorologicky výhodné měsíce.

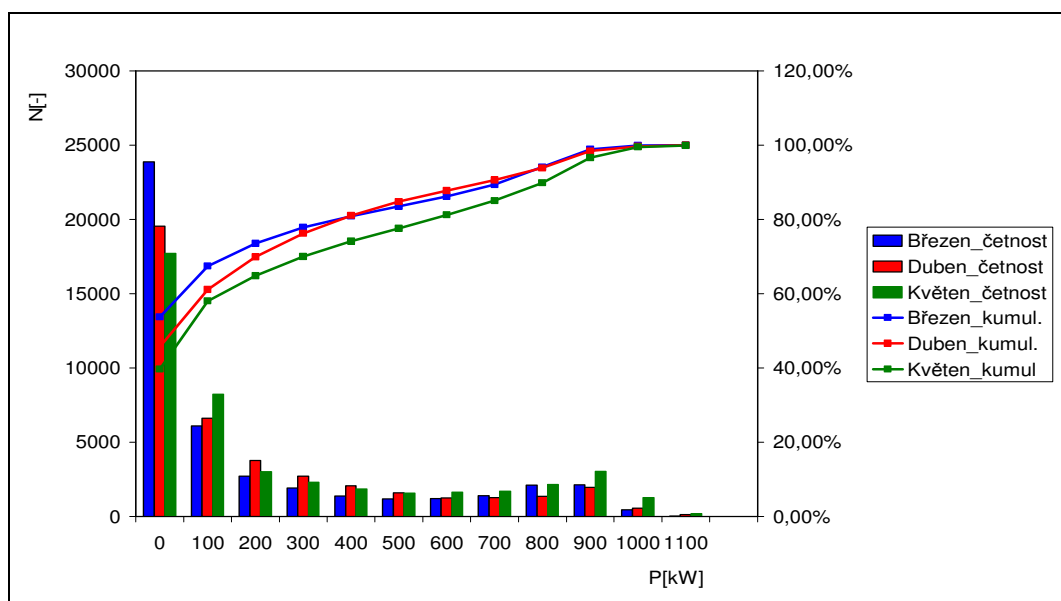
V grafu na Obr. 41 jsou, pro srovnání, zobrazeny denní koeficienty využití sluneční elektrárny pro měsíce s nejhoršími meteorologickými podmínkami. Jedná se o měsíce listopad, prosinec a leden. Z grafu je patrné, že koeficient využití se v prosinci pohybuje kolem hodnoty 1 %. V lednu je situace o něco lepší, koeficient výkonu, se ve většině případů pohybuje v rozmezí 2 % - 4 %. V listopadu je situace nejpříznivější, zhruba v polovině případů překročí koeficient výkonu hodnotu 6 %.



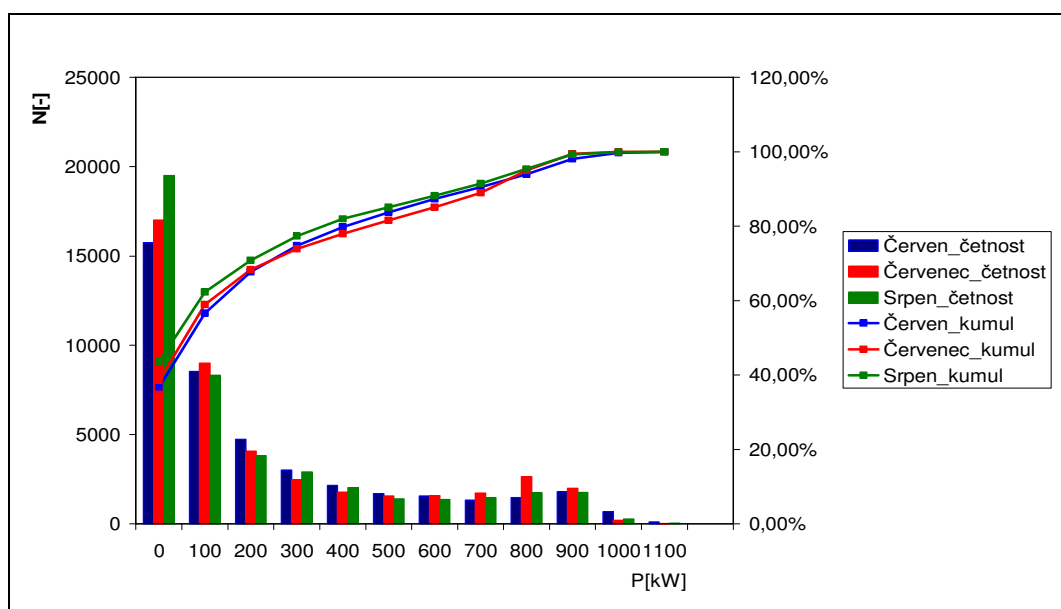
Obr. 41 Denní koeficient využití pro meteorologicky nevýhodné měsíce.

### 5.3.3 Histogram četnosti dodávaného výkonu

Na Obr. 42 je zobrazen histogram četnosti výskytu jednotlivých hodnot z fotovoltaické elektrárny pro měsíce březen, duben a květen. Pro vykreslení grafu byla použita data z minutového měření dodávaného okamžitého činného výkonu. První sloupec na vodorovné ose znamená odběr elektrické energie ze sítě pro vlastní spotřebu, následující sloupce zobrazují počet výskytu daného výkonu ve sledovaném období. Je zřejmé, že s blížícím se letním počasím klesá počet nulových hodnot.

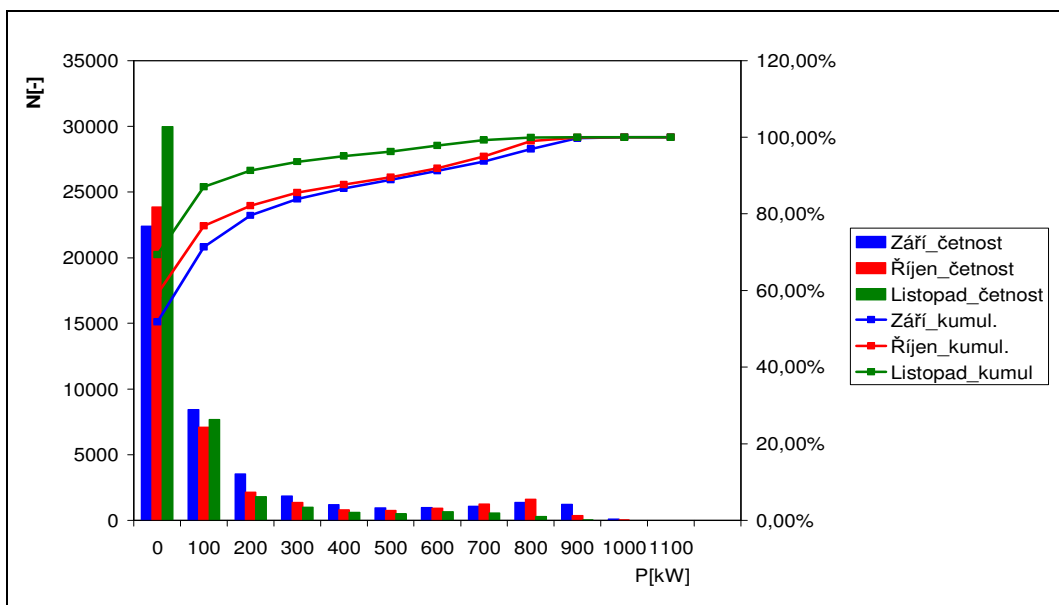


Obr. 42 Histogram četnosti dodávaného výkonu jaro.

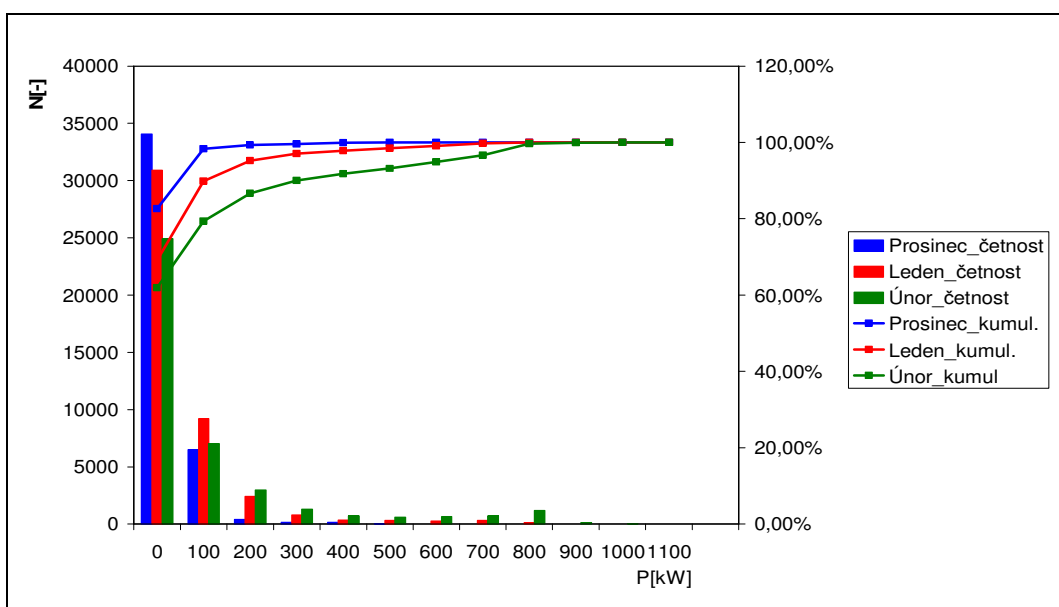


Obr. 43 Histogram četnosti dodávaného výkonu léto

Na Obr. 22 je zobrazen histogram četnosti výskytu jednotlivých hodnot dodávaného okamžitého činného výkonu z fotovoltaické elektrárny pro měsíce červen, červenec a srpen. Jedná se o měsíce s největším dodávaným výkonem. Oproti jarním měsícům došlo ke snížení vlastního odběru a zvýšení dodávek, zejména v oblasti 100 kW a 200 kW. Na následujících grafech Obr. 44 a Obr. 45 jsou zobrazeny histogramy pro podzimní respektive zimní měsíce. Z grafu je zřejmý opačný efekt, tedy úbytek počtu výskytu dodávaných výkonů a zvýšení počtu výskytu nulové dodávky. Extrémní situace nastává v prosinci, kdy většina výskytu výkonu je v nulové hodnotě.



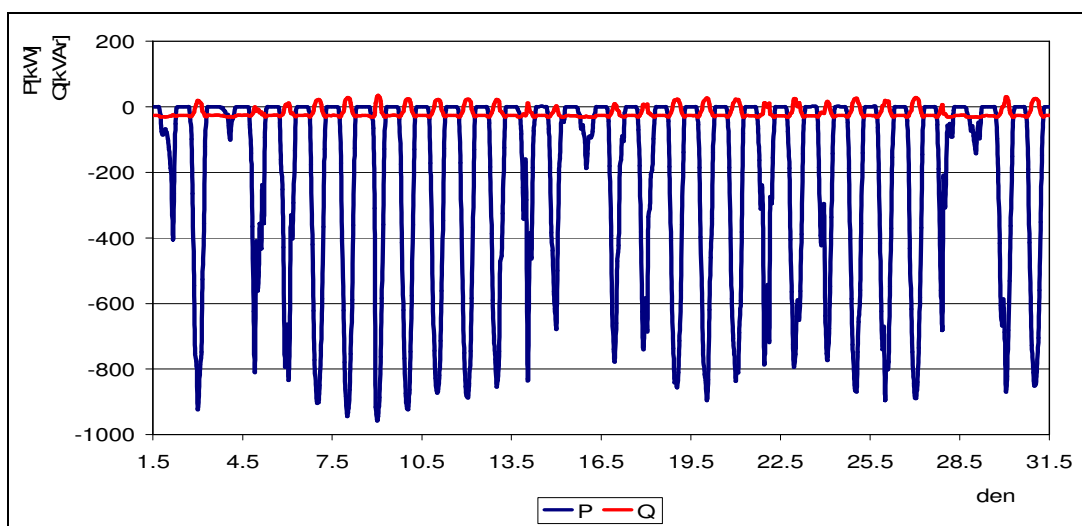
Obr. 44 Histogram četnosti dodávaného výkonu podzim.



Obr. 45 Histogram četnosti dodávaného výkonu zima.

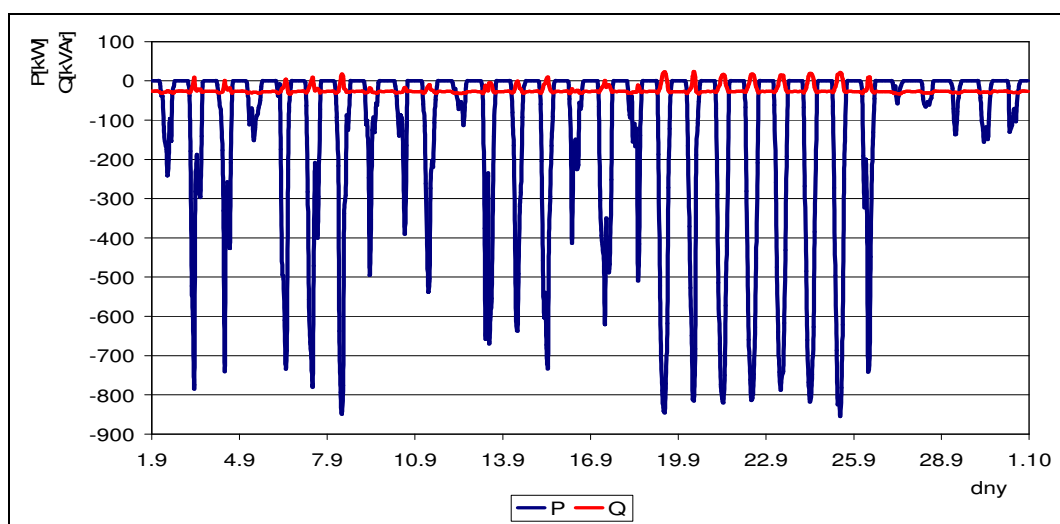
### 5.3.4 Analýza kolísání činného a jalového výkonu

Na Obr. 46 je zobrazeno kolísání činného a jalového výkonu květnu 2011. Jak je z grafu patrné, elektrárna, s výjimkou několika dní (1.5, 3.5, 15.5, 29.5), dodávala do sítě výkon celý měsíc. Dodávaný okamžitý činný výkon se pohyboval kolem hodnoty 800 kW. Z grafu tedy plyne, že měsíc byl slunečný.



Obr. 46 Kolísání činného a jalového výkonu v květnu 2011.

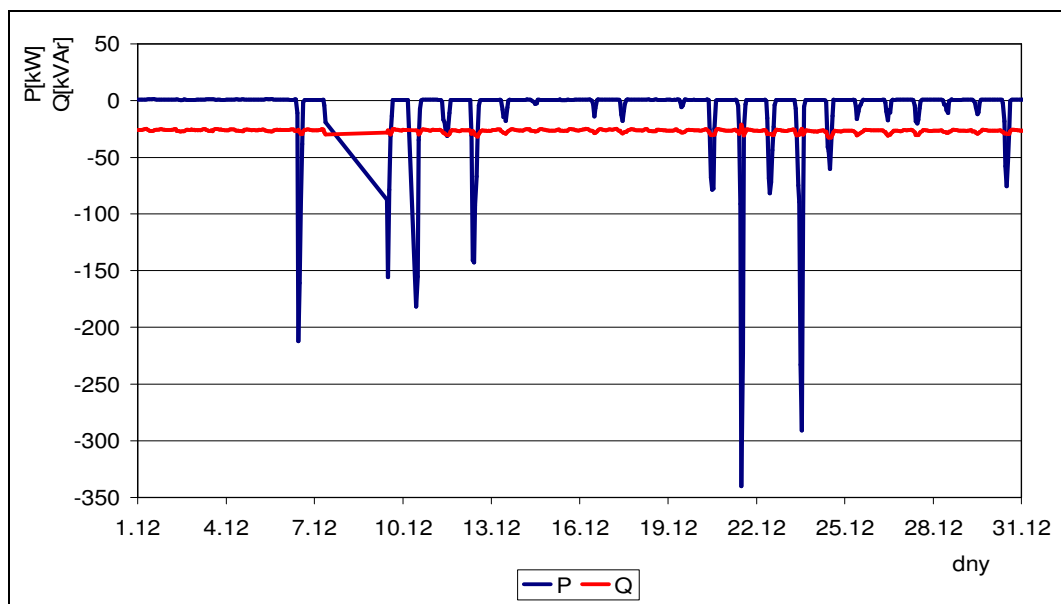
V následujícím grafu, na Obr. 47 je zobrazeno kolísání činného a jalového výkonu v září 2010. V tomto měsíci už byly sluneční podmínky horší. Docházelo ke střídání slunného počasí s oblačností. Nejlepší situace byla v období mezi 18.9 a 26.9, kdy elektrárna v poledních hodinách dodávala stabilně 800 kW. Naopak od 27.9 až do konce měsíce byla výroba elektrické energie zanedbatelná.



Obr. 47 PQ kolísání činného a jalového výkonu v září 2010.



V následujícím grafu na Obr. 48 je zobrazeno kolísání činného a jalového výkonu v prosinci 2010. Jak je známo jedná se o měsíc. S nejnižším slunečním svitem, což je z grafu zřejmé. Pouze 21.12 a 23.12 dosáhla hodnota dodávaného výkonu 300 kW. V druhém týdnu měsíce se několikrát pohyboval dodávaný výkon kolem 150 kW. Ve zbytku měsíce byl dodávaný výkon z této výroby zanedbatelný. Dne 8. 12. došlo k výpadku měření, z této příčiny je přechod mezi 7. 12 a 9. 12 linearizován.



Obr. 48 Kolísání činného a jalového výkonu v prosinci 2010.

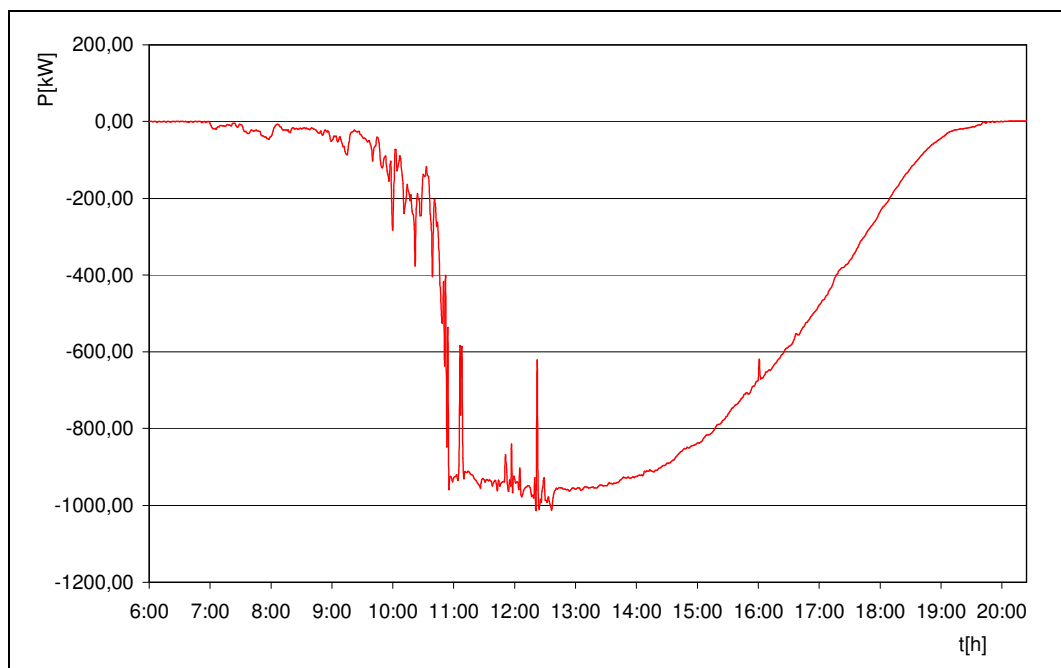
### 5.4 Denní závislost

V předchozí podkapitole 5.3 byly prezentovány průměrné výsledky získané aritmetickým průměrem. Tyto výsledky ovšem nejsou vhodné pro podrobnější analýzu vlivu sluneční elektrárny na provoz elektrizační soustavy. Grafy sestavené pro hodnocení denní závislosti jsou zkonstruovány z okamžitých minutových hodnot. V následující části budou podrobněji analyzovány vybrané dny z měsíce května.

#### 5.4.1 Dodávaný okamžitý činný výkon

V grafu na Obr. 49 je zobrazen okamžitý činný výkon solární elektrárny ze dne 8. 5. 2011. Elektrárna začala dodávat elektrickou energii kolem sedmé hodiny, první dvě hodiny ovšem pouze okrajově. K nárůstu výkonu téměř na jmenovitou hodnotu došlo mezi 9:30 až 10:30. Následující čtyři hodiny elektrárna dodávala necelých 1000 kW téměř konstantně. Kolem 14:30 začal téměř lineární pokles dodávky, který trval kolem čtyř hodin až na nulovou hodnotu.

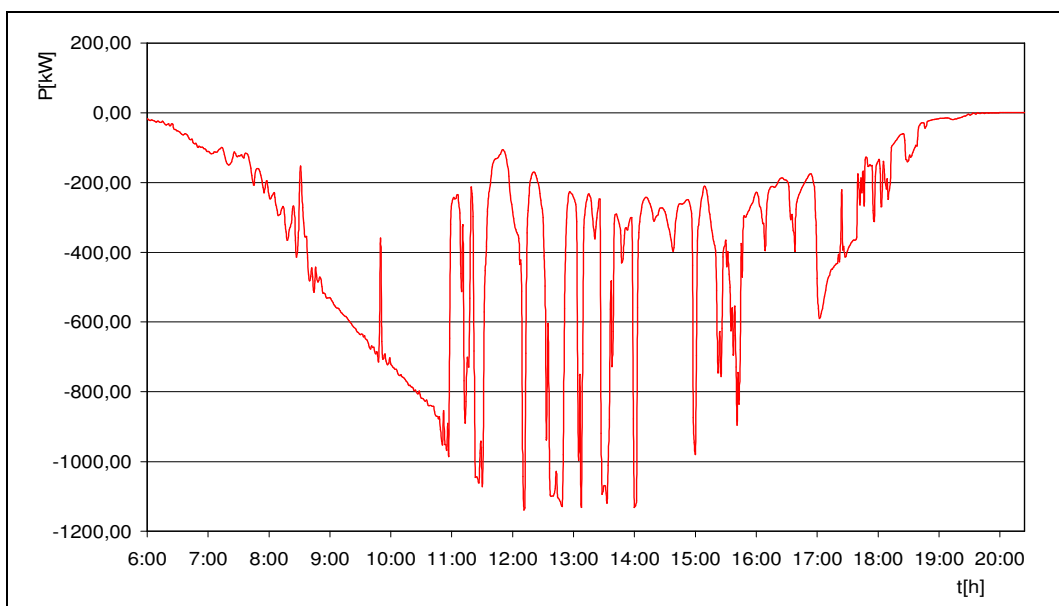
Výsledná křivka výkonu solární elektrárny je důležitá informace pro provozovatele elektrizační soustavy, do níž je výkon vyveden, pro optimální plánování rezerv. V tomto případě dodávaný výkon kolísá pouze nepatrně, proto nevyčerpává výkonové zálohy držené v jiných zdrojích, schopných dodávat výkon podle potřeby.



Obr. 49 Výkon FVE 8.5.2011.

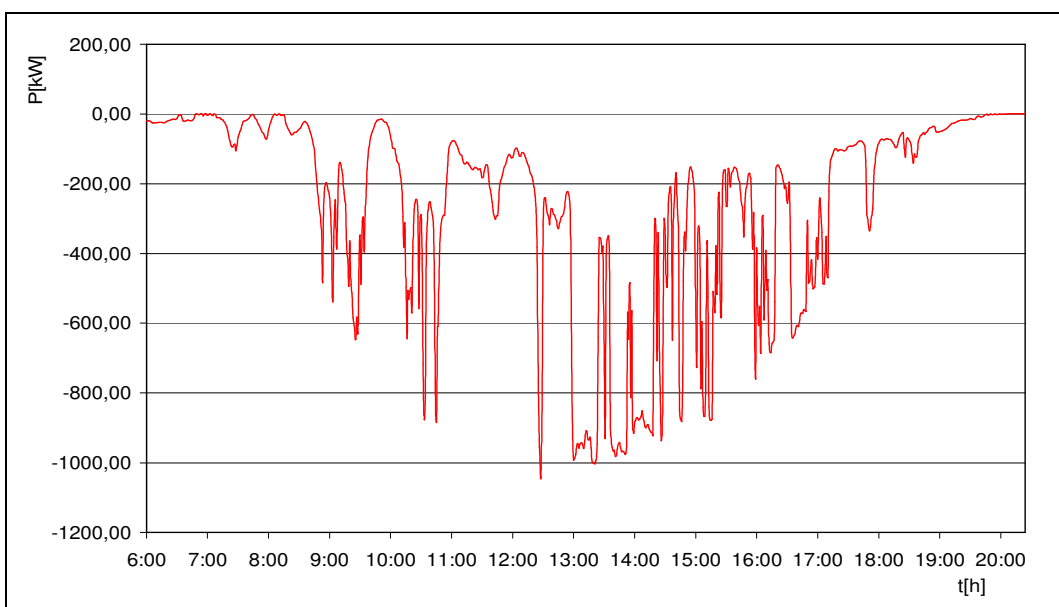
V následujícím grafu, kde je na Obr. 50 zobrazen dodávaný okamžitý činný výkon solární elektrárny, ze 4. 5. 2011, je situace zcela odlišná. Elektrárna začíná dodávat výkon kolem šesté hodiny ranní. Zhruba do jedenácté hodiny výkon, až na jisté odchylky, konstantně narůstá až do hodnoty instalovaného výkonu elektrárny. V následujících pěti hodinách ovšem dodávaný výkon kolísá v rozmezí zhruba 200 kW až 1100 kW. Po 16 hodině už dochází k razantnímu snižování výkonu a po 19 hodině elektrárna přestává elektrickou energii dodávat.

Z výsledné křivky výkonu, je patrné, že dodávaný okamžitý činný výkon kolísá s téměř 80 % amplitudou. Z tohoto grafu je tedy dobře patrný vliv na denní diagram zatížení. Takto pracující elektrárna představuje značné požadavky na výkonové zálohy držené v konvenčních zdrojích. Velikost těchto požadavků je dále závislá na dalších činitelích, mezi něž patří: kde je elektrárna připojena, jaké jsou odběry v dané lokalitě, počet dalších solárních elektráren a jejich instalovaný výkon připojených na stejnou rozvodnu.



Obr. 50 Výkon FVE 4.5.2011.

V grafu na Obr. 51 je zobrazen dodávaný výkon ze dne 13. 5. 2011. Situace je zde odlišná, mezi osmou a devátou hodinou se dodávaný výkon pohybuje v rozmezí 200 kW – 600 kW. Následující hodinu elektrárna téměř nevyrábí. Následuje asi hodinové kolísání mezi 200 kW – 800 kW. Další dvě hodiny se dodávaný výkon pohybuje kolem 200 kW. Kolem 12:30 dochází ke značnému kolísání dodávaného výkonu mezi 200 kW až 1000 kW, které se postupně snižuje až do devatenácté hodiny, kdy elektrárna přestává vyrábět.



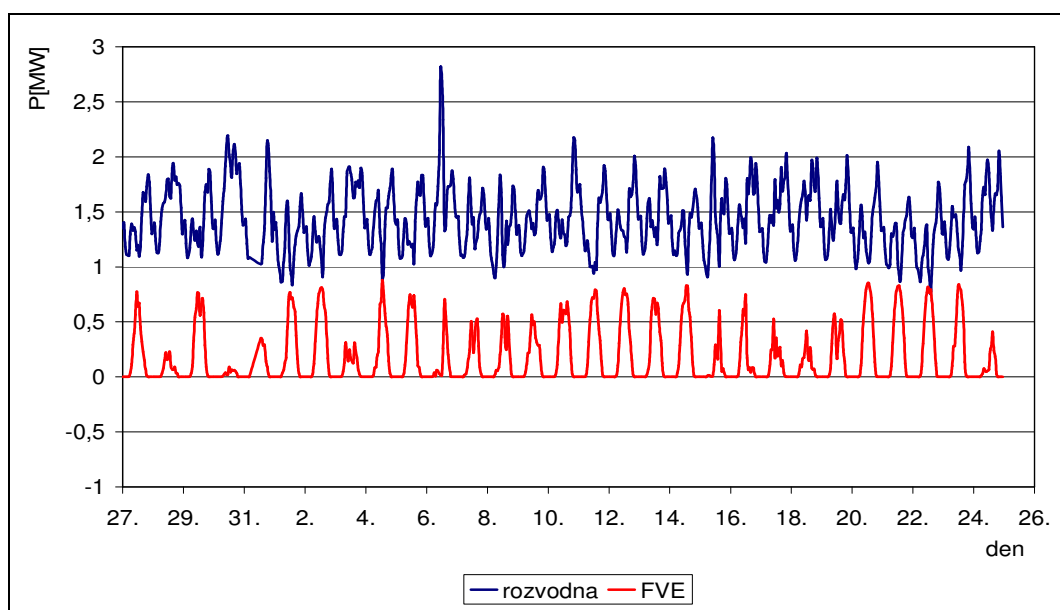
Obr. 51 Výkon FVE 13.5.2011.

## 5.5 Vliv fotovoltaické elektrárny na denní diagram zatížení

Pro posouzení vlivu vybrané fotovoltaické elektrárny na denní diagram zatížení, jsou použity data z měření výstupních, minutových okamžitých hodnot činného a jalového výkonu FVE ve Starojické Lhotě a rozvodny 22/110 kV v Novém Jičíně, do které je elektrárna napojena. Zpracována jsou data z období od 27. července 2010 do 25. srpna 2010. Pro lepší přehlednost vlivu FVE na DDZ jsou v této podkapitole dodávky z elektrárny uvedeny v kladných hodnotách.

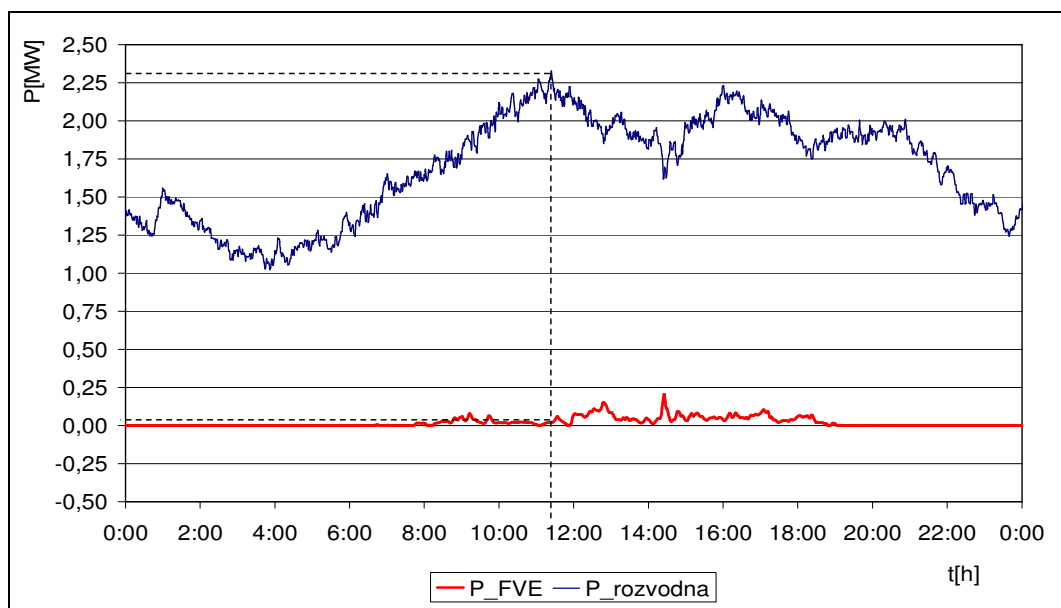
### 5.5.1 Srovnání činných výkonů na rozvodně a FVE ve sledovaném období

V grafu na Obr. 52 je zobrazeno srovnání činných výkonů s příspěvky fotovoltaické elektrárny ve sledovaném období. Pro posouzení vlivu je vhodné se soustředit na maximální hodnoty výkonu rozvodny a dodávaný výkon elektrárny v tomtéž čase. Maximální hodnota výkonu sítě byla 30. července a 6. srpna. Prozkoumána je také opačná situace. Ta nastává v případě, kdy je výkon dodávaný elektrárnou se blíží jmenovitému výkonu a současně dochází ke snížení zatížení. Z Obr. 52 se zdá, že tato situace se nevyskytuje. Tento graf je ovšem sestaven z průměrných hodinových intervalů, je proto pouze orientační. V následujících grafech jsou již prezentovány výsledky minutových okamžitých hodnot.



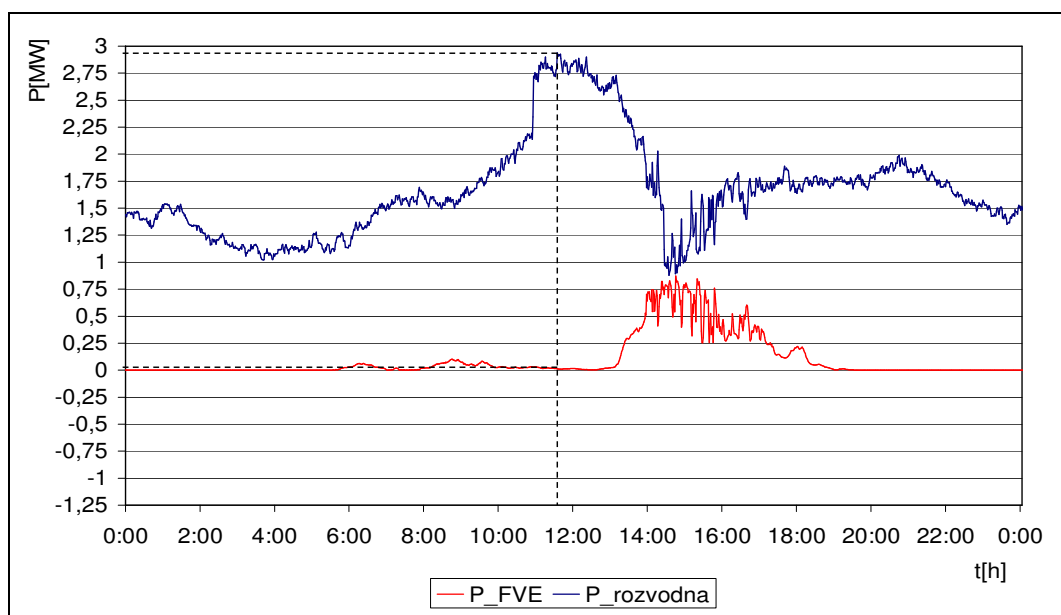
Obr. 52 Srovnání výkonů na rozvodně s příspěvky FVE ve sledovaném období.

V grafu na Obr. 53 je zobrazen podrobný snímek z 30. července. Jedná se o den, kdy se na rozvodně vyskytla maximální hodnota výkonu, jmenovitě hodnota 2,33 MW. V té době, v čase 11:24, dodávala elektrárna do sítě výkon 0,02 MW. Na výkon rozvodny měl tedy příspěvek elektrárny zanedbatelnou vliv.



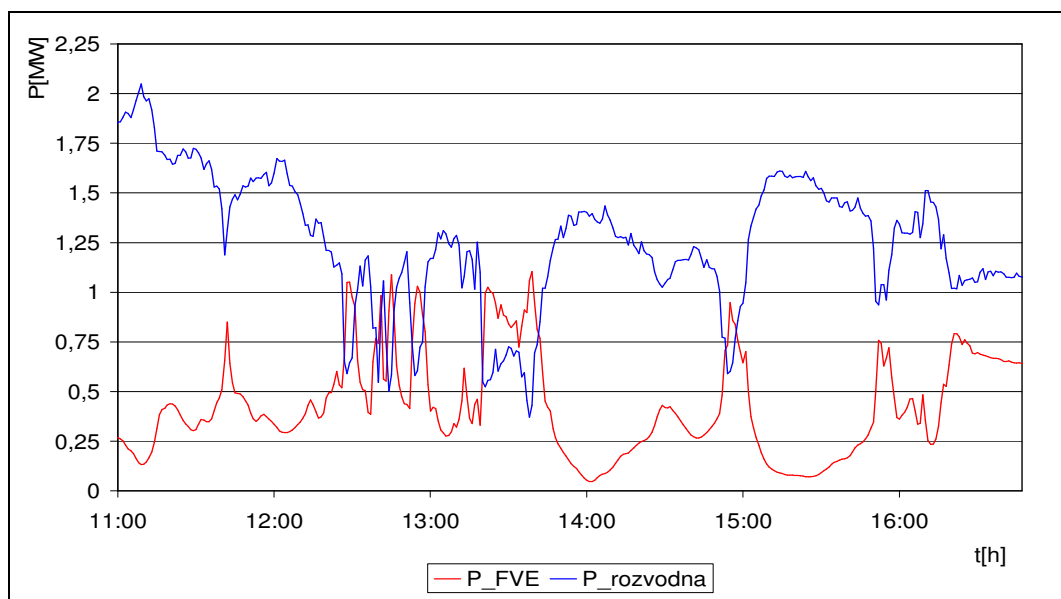
Obr. 53 Srovnání výkonů na rozvodně s příspěvky FVE 30. 7. 2010.

V grafu na Obr. 54 je zobrazen snímek z 6. srpna. Z grafu je patrné, že maximální okamžitý činný výkon sítě byl, v čase 11:40, roven 2,94 MW. V tomto čase dodávala elektrárna do sítě výkon 0,0015 MW. Z předchozích grafů je zřejmé, že na maximální hodnotu výkonu v rozvodně nemá elektrárna nijak významný vliv.

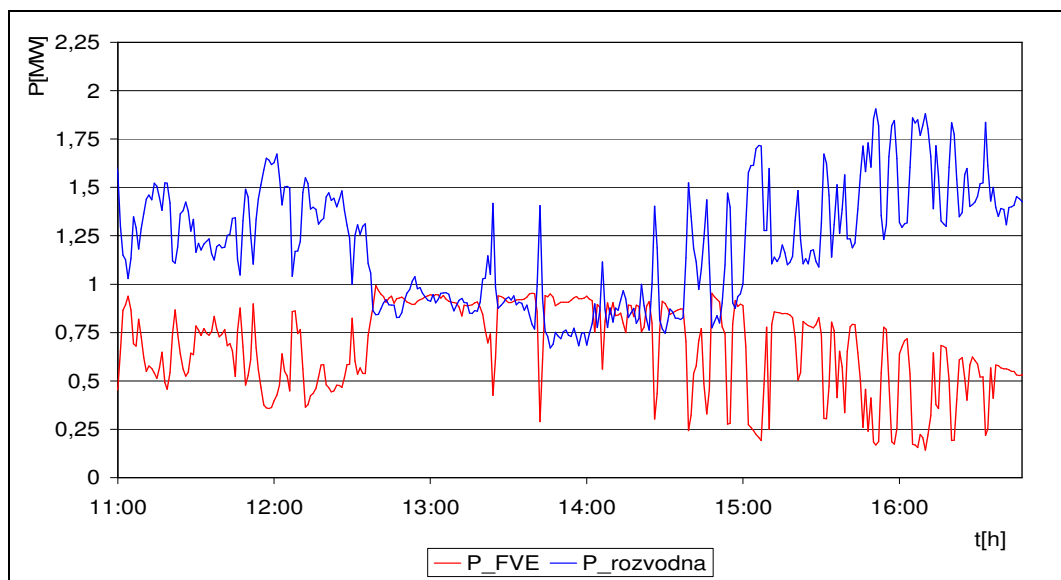


Obr. 54 Srovnání výkonů na rozvodně s příspěvky FVE 6. 8. 2011.

V případě sledování vlivu FVE na rozvodnu, došlo v určitých dnech k negativní situaci. Okamžitý činný výkon dodávaný elektrárnou byl vyšší než lokální spotřeba. V těchto případech dochází k zpětnému toku elektrické energie do nadřazené soustavy. Tento problém byl teoreticky popsán v kapitole 3.3. Na Obr. 55 ze dne 8. srpna je tento přetok nejlépe viditelný v čase mezi 13:22 – 13:42. Na Obr. 56 je zobrazená obdobná situace ze dne 4. srpna. Největší hodnota přetoku se vyskytla v období mezi 13:45 – 14:05. Maximální přetok byl 0,25 MW v čase 14:01. Z grafu na Obr. 55 a Obr. 56 je zřejmé že tato elektrárna ovlivňuje provoz rozvodny a je nutné tuto situaci prozkoumat podrobněji.



Obr. 55 Srovnání výkonů na rozvodně s příspěvky FVE v poledních hodinách dne 8. 8. 2011.

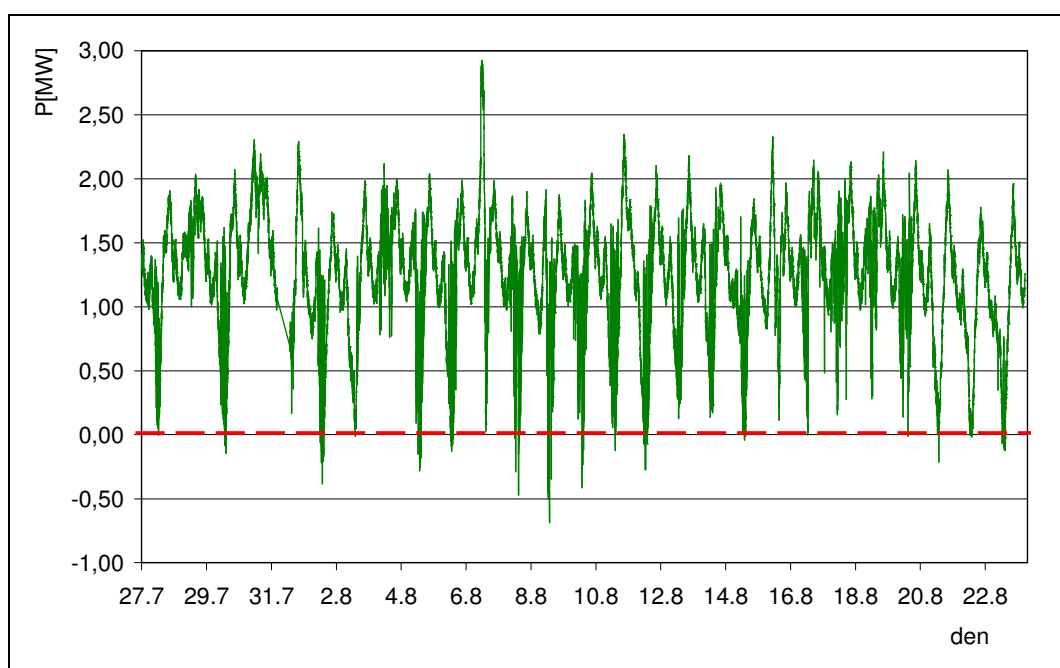


Obr. 56 Srovnání výkonů na rozvodně s příspěvky FVE v poledních hodinách dne 4. 8. 2011.

### 5.5.2 Inverzní tok činného výkonu

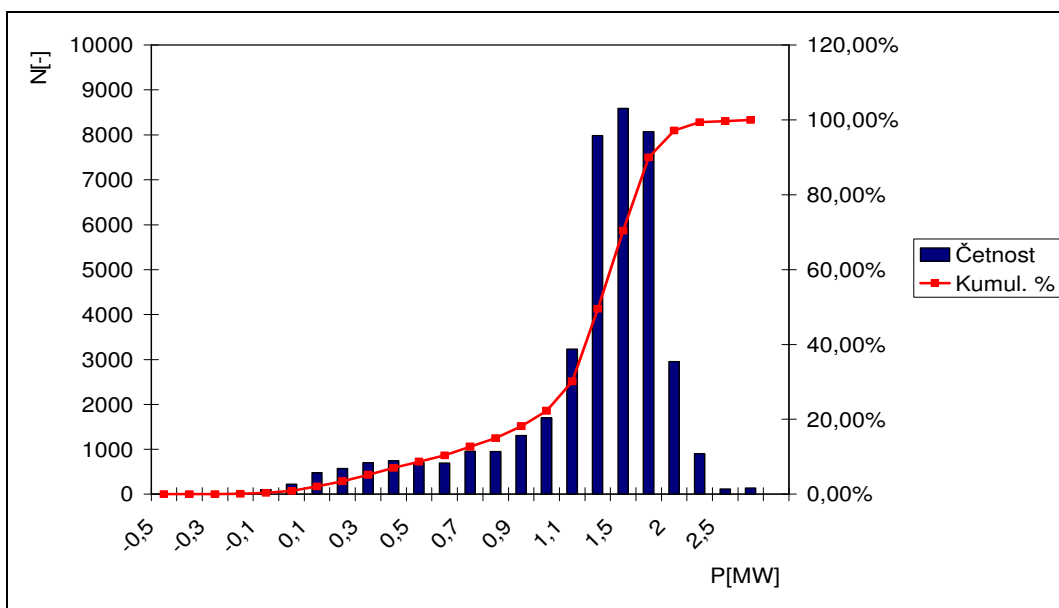
Z podkapitoly 5.5.1 vyplynulo, že v době poledních špiček může docházet k přetokům elektrické energie do nadřazené soustavy. Tato situace byla monitorována ve dnech kdy FVE dodává do sítě okamžitý činný výkon blízký jmenovitému, a současně došlo ke snížení spotřeby. Není možné proto lokálně veškerou elektřinu spotřebovat, a podle fyzikálních zákonů nadbytečná energie v síti zůstat nemůže.

Graf na Obr. 57 byl získán rozdílem okamžitého činného výkonu na rozvodně a okamžitého činného výkonu v elektrárně. Z tohoto důvodu kladné hodnoty okamžitého činného výkonu představují tok z nadřazené soustavy do rozvodny a záporné hodnoty tok opačný. Z grafu je zřejmé, že průměrné zatížení v dané lokalitě se pohybuje v rozmezí 1,5 MW až 2 MW. Ovšem v době příznivých slunečních podmínek, v poledních hodinách, se zatížení na rozvodně blíží nule, z čehož vyplývá, že většina spotřeby je hrazena solární elektrárnou, což z hlediska držení záloh není příznivý stav. Ve dnech 29.7, 1.8, 2.8, 4.8, 5.8, 7. – 11.8, 14.8 a 20. – 22.8.2011 došlo k závažnější situaci, a to k přetokům výkonu do nadřazené soustavy. Tento stav sebou nese celou řadu problému. Teoretické shrnutí problematiky zpětného toku výkonu je obsaženo v podkapitole 3.3.



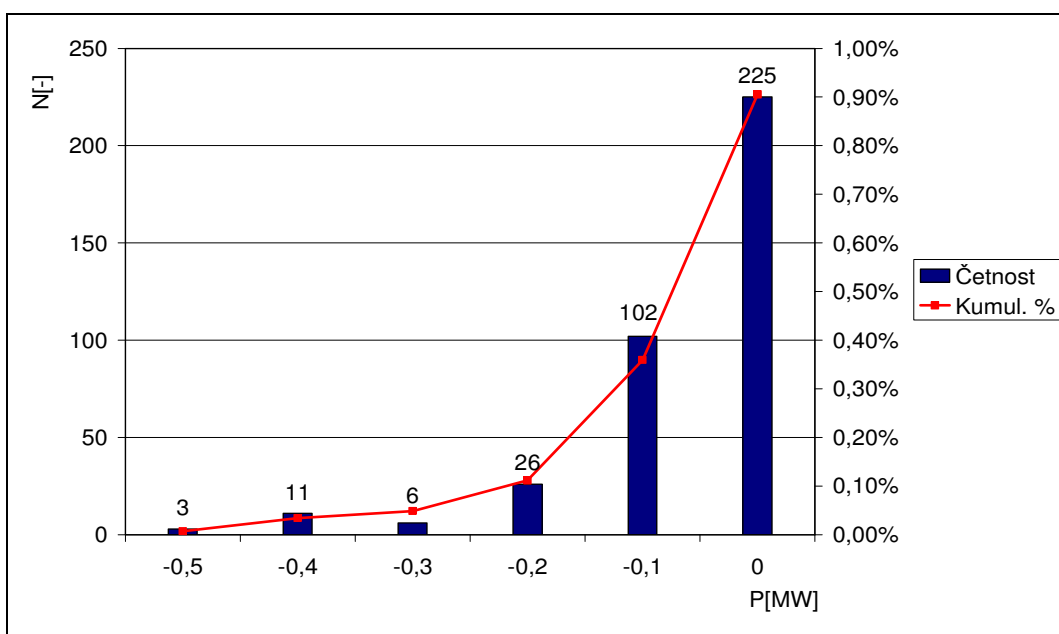
Obr. 57 Výkon dodávaný z nadřazené soustavy.

Na Obr. 58 je zobrazena četnost výskytu jednotlivých stupňů dodávaného okamžitého činného výkonu z nadřazené soustavy. Z histogramu jsou patrné, že nejčastější hodnoty dodávaného výkonu jsou 1,5 MW a 2 MW. Výskyt inverzního toku výkonu se zdá být zanedbatelný. Tento pohled je ovšem zavádějící. Inverzní tok se vyskytuje, jeho kumulativní podíl je ovšem, vzhledem k ostatním hodnotám, zanedbatelný. Je totiž menší než 1 %.



Obr. 58 Histogram četnosti dodávaného výkonu z nadřazené soustavy.

V histogramu na Obr. 59 je zobrazena pouze záporná část četnosti dodávaného výkonu. Z kumulativního podílu je zřejmé, že záporný tok výkonu se vyskytl v 0,9 % času provozu. Nejčastější záporná dodávka byla v mezi od -0,1 MW do 0 MW. Ve čtrnácti případech se vyskytl zpětný tok výkonu větší nebo rovný 0,4 MW.

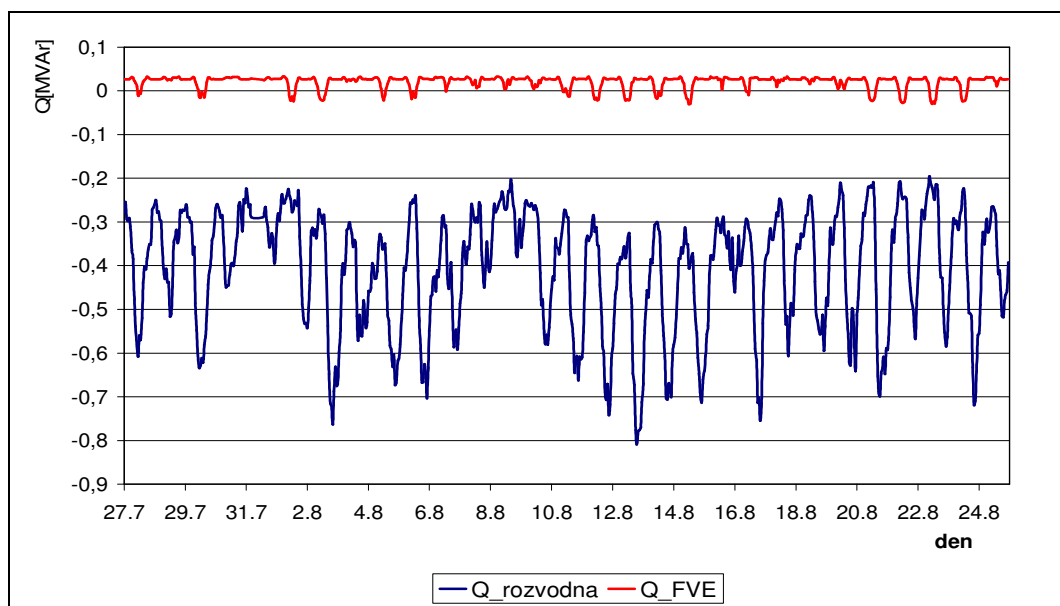


Obr. 59 Záporná část četnosti dodávaného výkonu z nadřazené soustavy.



### 5.5.3 Srovnání jalových výkonů na rozvodně a FVE ve sledovaném období

V grafu na Obr. 60 je zobrazeno srovnání okamžitých jalových výkonů na rozvodně s příspěvky z fotovoltaické elektrárny ve sledovaném období. Maximální hodnota jalového výkonu v síti zhruba 0,895 MVar byla dne 12. srpna v 20:40. V té době dodávala elektrárna 0,027 MVar. Nejvíce energie dodávala fotovoltaická elektrárna dne 8. srpna v 13:40 a to 0,047 MVar. Vůči síti se jedná o nepatrnou dodávku. V té době disponovala síť jalovým výkonem o hodnotě 0,28 MVar.



Obr. 60 Srovnání jalových výkonů na rozvodně s příspěvky FVE.

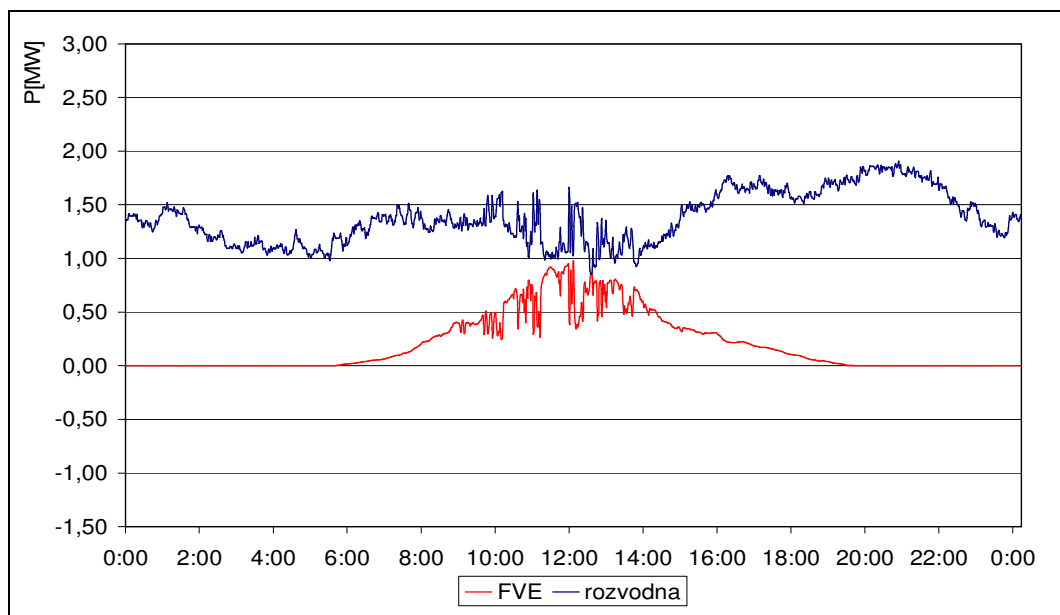
### 5.5.4 Podrobnější analýza denního diagramu zatížení

Na Obr. 61 je zobrazen denní diagram zatížení ze dne 27. července 2010. Jednalo se o úterý, tedy běžný pracovní den. Horní křivka zobrazuje zatížení rozvodny, spodní křivka vykresluje dodávaný výkon z fotovoltaické elektrárny.

Z denního diagramu zatížení je patrný typický průběh spotřeby elektrické energie. V nočních hodinách, mezi první až pátou hodinou ranní je poptávka po elektrické energii nejmenší, pohybuje se těsně nad 1 MW. V té době fotovoltaická elektrárna nepracuje. Kolem šesté hodiny ranní se spotřeba elektřiny začíná zvyšovat, zhruba do osmé hodiny, kdy se nacházíme v ranní špičce. V té době solární elektrárna začíná dodávat energii. Zhruba do desáté hodiny dopolední kryje rozvodna spotřebu kolem hodnoty 1,3 MW. V poledních hodinách dochází k nárůstu výkonu ve sluneční elektrárně. Tento jev je příznivý, protože pomáhá krýt lokální spotřebu, čímž snižuje dodávaný výkon do rozvodny z nadřazené sítě. Nastává ovšem klasický problém slunečních elektráren a to kolísání výkonu, které má za následek kolísání výkonu na rozvodně v rozpětí 0,5 MW. Kolem čtrnácté hodiny dochází k postupnému snižování dodávaného výkonu z fotovoltaické elektrárny. Současně dochází ke zvýšenému odběru elektřiny, z důvodu návratu zaměstnanců do svých

domácností. Kolem 20 hodiny už FVE elektrárna nevyrábí, spotřeba elektřiny ovšem stále stoupá, až do 22 hodiny, kdy nastává večerní špička asi 1,8 MW.

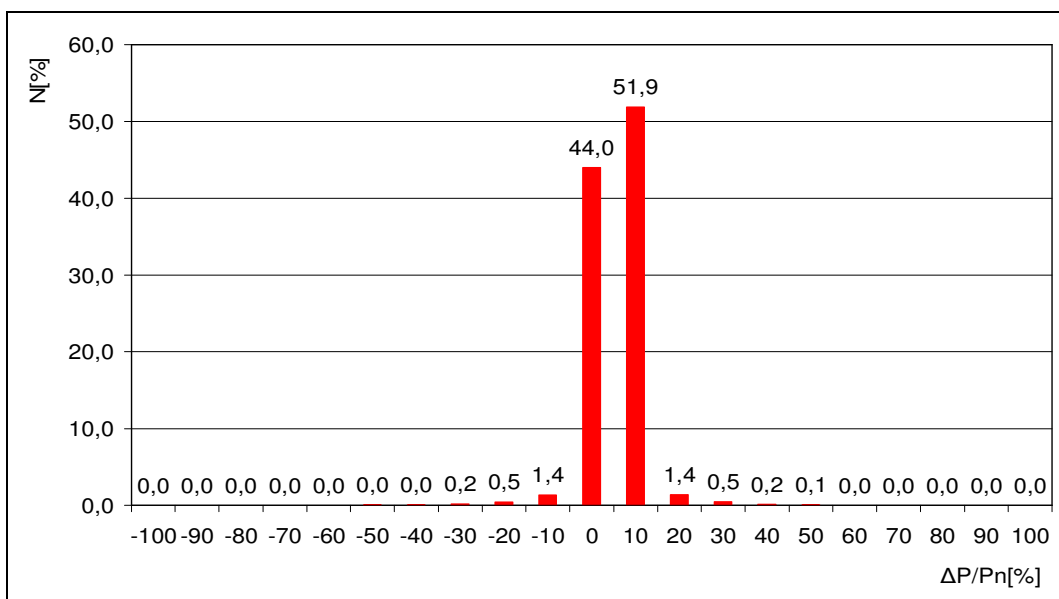
Z Obr. 61 je zřejmé, že FVE elektrárna může svým provozem snížit polední zatížení lokální rozvodny. Ideálním řešením by ovšem bylo elektrickou energii uchovat a dodat ji do sítě v době největšího zatížení, tedy mezi 18 a 22 hodinou.



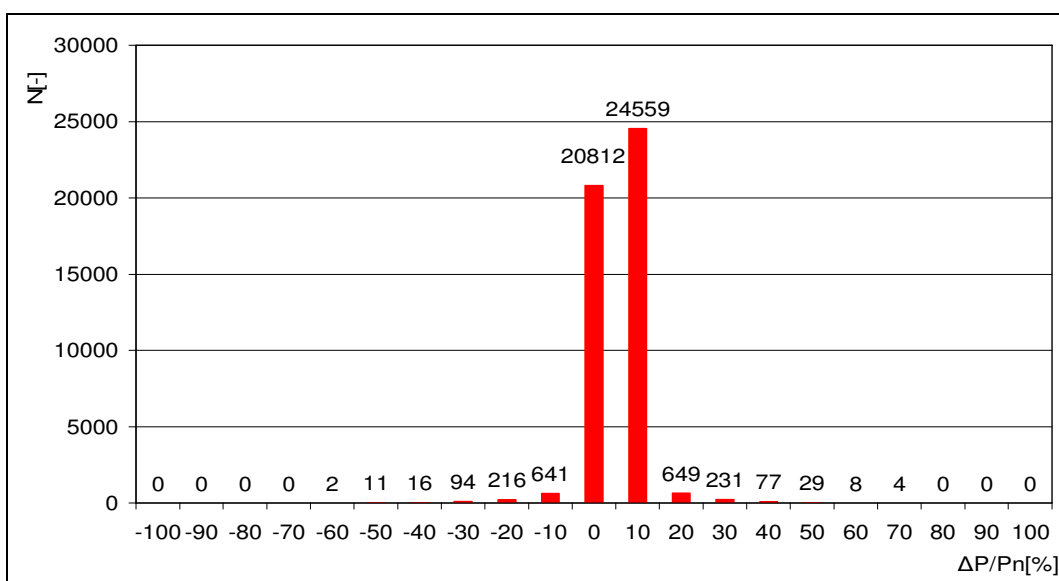
Obr. 61 DDZ rozvodny a FVE.

### 5.6 Dynamika variability činného výkonu

Protože fotovoltaické elektrárny jsou zdroje s nestabilní dodávkou elektrické energie, je nutné sledovat, jak se mění jejich okamžitý činný výkon. Ke sledování počtu změny o určité výchylce výkonu se používají histogramy. Na Obr. 62 je zobrazen histogram, který udává procentuální změnu výkonu o jednotlivých stupních. Jedná se o histogram sestavený z desetiminutových okamžitých hodnot výkonu, ze sledovaného období v délce jednoho roku. Z histogramů je zřejmé, že v 44 % kolísá výkon v rozmezí -10 % až 0 %, v 51,9 % v rozmezí 0 % až 10 %. V ostatních případech se kolísání výkonu jeví jako zanedbatelné.



Obr. 62 Procentuální změna výkonu elektrárny.

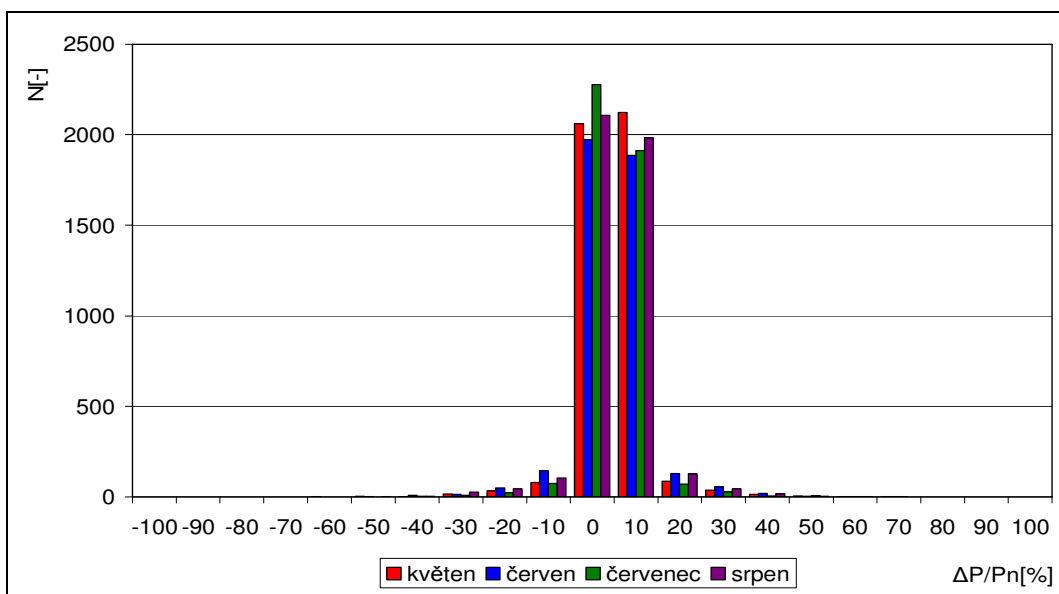


Obr. 63 Počet výskytu změn výkonu elektrárny.

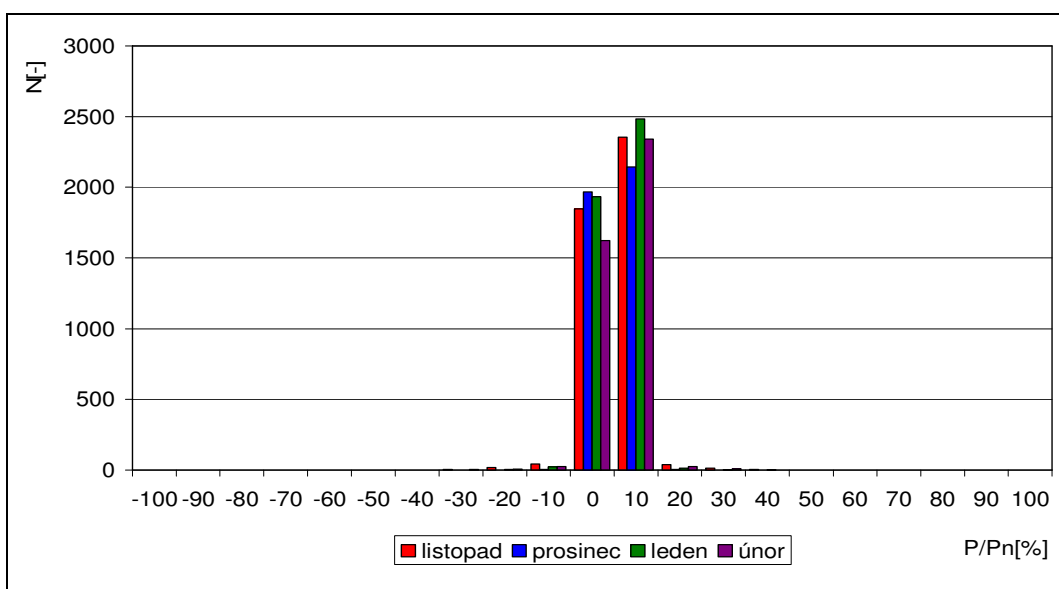
Z Obr. 63, kde je histogram vyjádřen počtem změn, ovšem vyplývá, že dochází ke kolísání výkonu i v řádu 70 %. Tento jev ovšem nebyl příliš častý, proto byl v procentuálním vyjádření zanedbán. Pro příklad ke změně výkonu o 50 % došlo 29 krát v kladné polaritě a 11 krát v záporné.

## 5. Analýza měření činného výkonu vytypované fotovoltaické elektrárny

Na Obr. 64 a Obr. 65 jsou pro srovnání zobrazeny histogramy pro letní a zimní měsíce. Z těchto histogramů je zřejmé, že v letních měsících jsou výkonové změny častější. Pracuje-li elektrárna s výkonem blízcím se jmenovitému, tak přecházející oblačnost způsobí kolísání výkonu. V zimních měsících, kdy výkon elektrárny je nepatrný, výraznější kolísání činného výkonu není technicky možné.



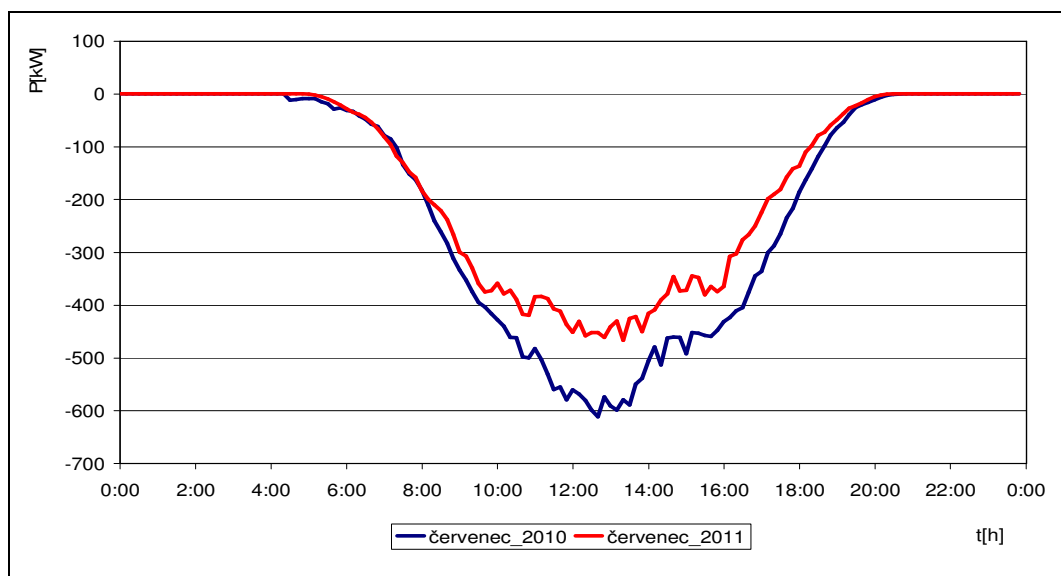
Obr. 64 Změna výkonu v jednotlivých letních měsících.



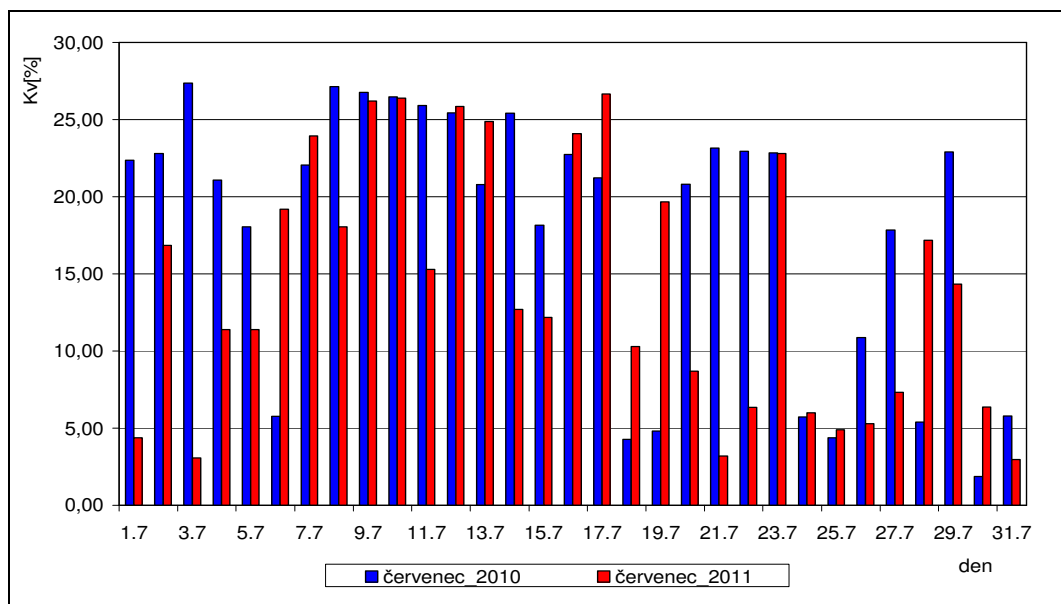
Obr. 65 Změna výkonu v jednotlivých zimních měsících.

## 5.7 Srovnání červenec 2010 – červenec 2011

V následující části je provedeno srovnání provozu fotovoltaické elektrárny v červenci 2010 s červencem 2011. Na Obr. 66 je zobrazen průměrný dodávaný okamžitý činný výkon výroby. V červenci 2010 dodávala elektrárna, v poledních hodinách, do sítě výkon kolem 600 kW. Ve stejném období v roce 2011 hodnotu zhruba o 100 kW menší. V červenci 2010 vyrobila elektrárna 145,987 MWh elektrické energie a pracovala s koeficientem využití 17,84 %. V následujícím roce vyrobila FVE 115,553 MWh elektřiny, pracující s koeficientem využití 14,12 %. Na Obr. 67 jsou zobrazeny koeficient využití elektrárny, pro jednotlivé dny.

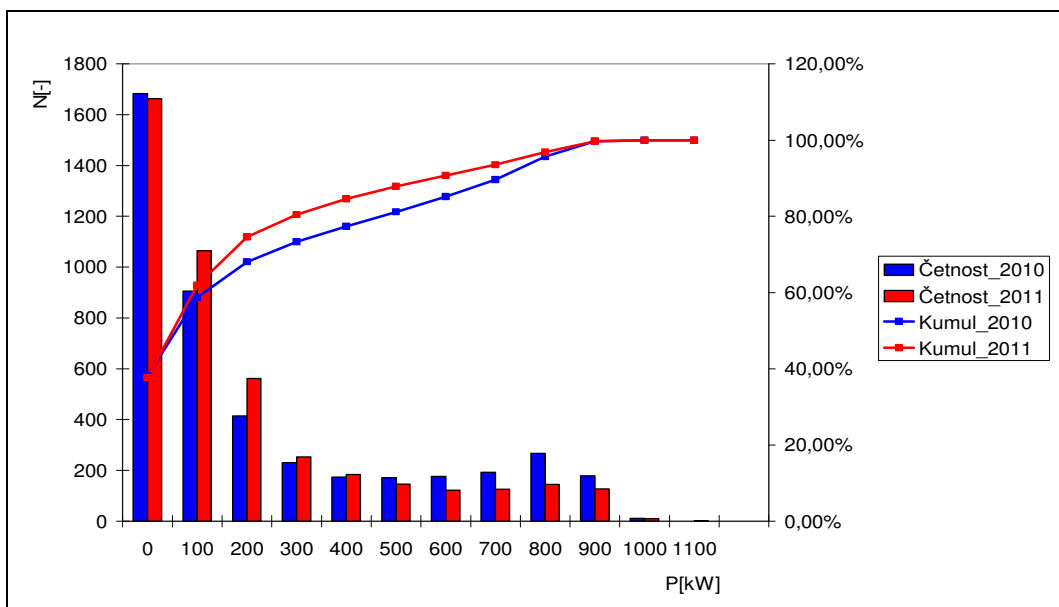


Obr. 66 Nárůst výkonu FVE ve vybraných měsících



Obr. 67 Koeficient využití ve vybraných měsících.

Na Obr. 68 je zobrazen histogram četnosti dodávaného výkonu. Rozdíl, kdy elektrárna nedodávala elektrickou energii, je nepatrný. V dodávce energie se už oba měsíce různí. Častější dodávka elektrické energie, o nižším výkonu zhruba do 400 kW, byla v roce 2011. Naproti tomu v roce 2010 byla častější dodávka výkonu v rozmezí 500 kW až 900 kW.



Obr. 68 Histogram četnosti dodávaného výkonu.

## 6 Závěr

Z důvodu preferování alternativních zdrojů před fosilními, vznikají nejen v České republice, různé projekty pro podporování těchto zdrojů. Největší podporu v ČR, a tedy i rozmach zaznamenala fotovoltaika, jejíž instalovaný výkon se během let 2009 a 2010 zvýšil z 3,4 MW na 1960 MW. V dalším období růst výkonu sice pořád pokračoval, ale už pozvolna. Nicméně i tak se fotovoltaika stala podstatnou částí v energetickém mixu České republiky a je proto nutné podrobně sledovat její chování v síti.

V rámci diplomové práce byla řešena problematika vlivu fotovoltaických elektráren na elektrizační soustavu. První kapitola byla věnována teorii výroby elektrické energie ze slunce. Principu činnosti fotovoltaických článků a jejich rozdělení. V další části kapitoly byla popsána aktuální situace rozvoje fotovoltaiky světové i v rámci České republiky. Byla zmíněna možnost dalšího rozšiřování, které je ovšem v současnosti velmi problematické.

Následující kapitola popisuje vlivy slunečních elektráren na elektrizační soustavu. Obsahuje základní informace o intenzitě slunečního záření, a z ní vyplývající dodávku výkonu z fotovoltaické elektrárny. Je ukázána výkonová křivka solární elektrárny, je probrán důležitý parametr fotovoltaických elektráren, koeficient využití. V další části kapitoly je probrána dynamika variability činného výkonu. Jedná se o jeden z rozhodujících parametrů pro plánování provozu elektrizační soustavy. Provoz fotovoltaických elektráren sebou nepřináší problémy pouze kolísáním dodávaného výkonu. Další problémy se vyskytují v závislosti na místě umístění elektrárny. Fotovoltaické zdroje se často umísťují na konci paprskového vedení, do distribuční soustavy. Pokud v daném místě pracují výroby s instalovaným výkonem, větším než je spotřeba lokality, dochází k nežádoucím přetokům energie do vyšších napěťových hladin. Těmto případům, je proto také věnována pozornost.

Obsahem další kapitoly jsou možnosti pro omezení negativních vlivů na elektrizační soustavu. V úvodu kapitoly byly probrány základy stability elektrizační soustavy, se zaměřením na problematiku podpůrných služeb. Hlavní náplní kapitoly jsou, již zmiňované možnosti pro omezení nároku na podpůrné služby. Jako základní možnosti jsem představil predikci výroby, soudobost elektráren a řízení spotřeby elektrické energie podle její výroby. Jako zajímavou alternativou se také nabízí spolupráce fotovoltaické elektrárny s elektrárnou větrnou. Každá z těchto možností je velice specifická a nabízí jisté výhody. Nelze proto jasně říci, která je nejvýhodnější. Dle mého názoru je výhodné ubírat se všemi směry. Výhoda predikce výroby elektrické energie z fotovoltaické elektrárny spočívá ve znalosti průběhu dodávaného výkonu s jistým předstihem. Tyto informace pak provozovatelům sítí umožní připravit se s předstihem na předpokládané výkonové změny. Soudobost solárních elektráren lze posuzovat s hlediska východu a západu slunce, nebo z hlediska přechodu frontálních oblačností. V rámci našich sítí, se z důvodu menších rozměrů České republiky, více osvědčí druhá možnost. Problematika řízení spotřeby elektrické energie podle její výroby, je v současnosti velmi často skloňované téma, v souvislosti

s problematikou Smart Grids. Předpokládám, že právě provoz těchto inteligentních sítí, v budoucnosti problematiku řízení spotřeby elektřiny podle její výroby vyřeší. Ačkoliv je problematika akumulace elektrické energie probrána až v samém závěru kapitoly, myslím si, že by se jí měla být věnována pozornost největší. V současnosti, se v jisté míře využívá akumulace pomocí přečerpávacích elektráren. Tento způsob je sice výhodný, ale investiční náklady jsou značné. Povedlo-li, by se najít relativně levný způsob uchování elektrické energie v potřebném rozsahu a čase, došlo by k eliminaci většiny negativních vlivů fotovoltaických elektráren.

Zkoumáním ročního provozu vytypované fotovoltaické elektrárny Starojická Lhota v období od 1. července 2010 do 31. června 2011 jsou v následující části vysloveny závěry pro roční, měsíční a denní provoz elektrárny. V další části pro vliv této elektrárny na denní diagram zatížení a dynamiku variability činného výkonu. Poslední část kapitoly je zaměřená na srovnání dodávaného výkonu v červenci 2010 a 2011. Zpracovávány byly data z minutového měření okamžitého činného i jalového výkonu.

První části jsou porovnávány jednotlivé měsíce jednoho roku. Z vykresleného grafu na Obr. 66 je patrný průběh dodávky okamžitého činného výkonu v jednotlivých měsících. Podle předpokladu nejvíce výkonu dodává elektrárna v měsících duben, květen, červen a červenec. Naopak v prosinci byla výroba téměř zanedbatelná. Tyto výsledky jsou způsobeny množstvím slunečního záření a úhlem dopadu slunečních paprsků. Roční koeficient využití byl 11,71 %. Během sledovaného období dodala elektrárna do sítě 1,131 GWh elektrické energie.

V další podkapitole jsou prezentovány výsledky pro srovnání vybraných dnů měsíců května, září a prosince. Jedná se o měsíce s maximálním, minimálním a průměrným dodávaným okamžitým činným výkonem. V květnu, ve sledovaném období, se ve většině případů, v poledních hodinách, pohyboval dodávaný výkon v rozmezí 800 kW až 1000 kW. V měsíci září byl okamžitý činný výkon velice nepravidelný. Dny kdy se dodávaný výkon blížil 800 kW, se střídaly s dny, kdy se výkon pohyboval v rozmezí do 200 kW. Oproti tomu v prosinci, ve většině případech, okamžitý činný výkon nedosáhl hodnoty 100 kW. Pro lepší znázornění dodávky výkonu, byly pro vybrané měsíce sestaveny grafy zobrazující koeficient využití v jednotlivých dnech a histogramy četnosti dodávaného výkonu.

V podkapitole denní závislost jsem se zaměřil na dodávaný okamžitý činný výkon ve vybraných dnech měsíce května. Osmého května dodávaný výkon kolísal pouze nepatrně. Oproti tomu ve dnech čtvrtého a třináctého května byla dodávka výkonu velmi nestabilní. Okamžitý činný výkon kolísal s téměř 80 % amplitudou. Elektrárna, jejíž okamžitý činný výkon je podobný jako situace z čtvrtého a třináctého května, vytváří značné požadavky na výkonové zálohy.

V následující podkapitole byl zkoumán vliv fotovoltaické elektrárny na denní diagram zatížení. Vliv byl posuzován zkoumáním dodávaného okamžitého činného a jalového výkonu elektrárny, vzhledem k dennímu diagramu zatížení rozvodny v Novém Jičíně. Ve sledovaném období byly posouzeny maximální a minimální hodnoty okamžitého činného výkonu v rozvodně,



současně s aktuální dodávkou z FVE. Zkoumáním dvou výkonových špiček na rozvodně bylo prokázáno, že na maximální hodnotu okamžitého činného výkonu v rozvodně nemá fotovoltaická elektrárna žádný vliv. Následně byl zkoumán vliv FVE na minimální hodnotu okamžitého činného výkonu na rozvodně. V tomto případě je situace zcela odlišná. V době příznivých slunečních podmínek je v poledních hodnotách elektrárna schopna pokrýt celou spotřebu elektrické energie v dané lokalitě. V některých případech došlo k větší výrobě elektrické energie než její spotřebě, a tedy k zpětnému toku činného výkonu do nadřazené soustavy. V těchto případech má tedy FVE negativní vliv nejen na rozvodnu, do níž je zapojená, ale také na nadřazenou soustavu.

Obsahem závěrečné podkapitoly je srovnání dodávaného okamžitého činného výkonu v červenci 2010 s červencem následujícího roku. Ze sestrojených grafů je zřejmé, že ačkoliv se jedná o stejný měsíc, dodávka výkonu se liší. Proto není možné, na základě starších informací, jistě říci, že v daném měsíci bude dodávaný výkon následující. Chceme-li, přesné informace o předpokládaném výkonu musíme spoléhat na aktuální predikci výroby elektrické energie.

Z výše uvedeného textu vyplývá, že fotovoltaická elektrárna je zdroj, který svým chodem způsobuje více problému než užitku. Dle mého názoru fotovoltaické elektrárny mohou přinášet pozitivní vliv na chod elektrizační soustavy. Je ovšem nutné počítat s nimi pouze jako s doplňkovým zdrojem, jehož dodávaný výkon nepřekročí 20 % - 30 % zatížení rozvodny, do níž je připojen. Jedná se pouze o orientační (odhadnutou) hodnotu, přesná hodnota soudobosti může být předmětem k dalšímu výzkumu.

Posledním bodem je zamyšlení se nad problematikou podpory obnovitelných zdrojů. Za zvážení by určitě stála možnost přesunutí legislativní podpory spíše na výkup elektrické energie z točivých zdrojů, mezi něž patří třeba bioplynové stanice. U těchto zdrojů nevznikají problémy s nestálostí výroby.

## Seznam obrázků

OBR. 1 PRÍMÉ A DIFUZNÍ ZÁŘENÍ V PODMÍNKÁCH ČR [27].....	3
OBR. 2 SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ FUNKCE SOLÁRNÍHO ČLÁNKU. [25] .....	4
OBR. 3 DRUHÝ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A) AMORFNÍ B) POLYKRISTALICKÝ C) MONOKRYSTALICKÝ. [29].....	5
OBR. 4 POKLES ÚČINNOSTI V ZÁVISLOSTI NA ČASE. [30] .....	6
OBR. 5 A) STAVBA FV PANELU, B) STAVBA FV POLE. [31] .....	6
OBR. 6 ZTRÁTY PŘI PŘEMĚNĚ SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ NA ELEKTRICKOU ENERGII. ....	7
OBR. 7 BLOKOVÉ SCHÉMA OSTROVNÍHO SYSTÉMU S AKUMULACÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE ( 12V I 230V). ....	8
OBR. 8 BLOKOVÉ SCHÉMA GRID - ON SYSTÉMU. ....	9
OBR. 9 BLOKOVÉ SCHÉMA MOŽNÉHO PŘIPOJENÍ FVE K PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ. ....	10
OBR. 10 FVE A) MALÁ STŘEŠNÍ INSTALACE B) VOLNĚ STOJÍCÍ INSTALACE.[31] .....	10
OBR. 11 NÁRŮST FOTOVOLTAIKY V POSLEDNÍCH LETECH. [23].....	11
OBR. 12 PROVOZ SLUNEČNÍCH ELEKTRÁREN V ČR, STAV K 1. 1. 2012. ....	12
OBR. 13 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ A ELEKTRICKÝ POTENCIÁL V ČR. [33] .....	13
OBR. 14 HISTOGRAM ČETNOSTI INTENZITY SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ. [3].....	15
OBR. 15 NÁRŮST VÝKONU FVE. [2] .....	16
OBR. 16 ČINNÝ A JALOVÝ VÝKON FVE SRPEN 2010. [2].....	16
OBR. 17 VÝKONOVÁ KŘIVKA ELEKTRÁRNY – PRŮMĚR. [3].....	17
OBR. 18 PQ DIAGRAM PROVOZNÍCH STAVŮ ELEKTRÁRNY. [3].....	18
OBR. 19 POČET ZMĚN VÝKONU. [3] .....	19
OBR. 20 REGULAČNÍ ROZSAH ELEKTRÁRENSKÉHO BLOKU. [17] .....	25
OBR. 21 PRIMÁRNÍ REGULACE A PRIMÁRNÍ REGULAČNÍ REZERVA. ....	26
OBR. 22 ČASOVÉ OBLASTI PŮSOBNÍ JEDNOTLIVÝCH REGULACÍ. ....	27
OBR. 23 OBECNÝ PRINCIP NEURONOVÝCH SÍTÍ. [2].....	29
OBR. 24 FÁZE PŘECHODU FRONTÁLNÍCH OBLAČNOSTÍ. ....	31
OBR. 25 PRŮBĚH OKAMŽITÉHO VÝKONU WPP, PV A WPP + PV V ČERVENCI. [9] .....	32
OBR. 26 PRŮBĚH OKAMŽITÉHO VÝKONU WPP, PV A WPP + PV V OBDOBÍ OD 8. 10. DO 15. 10. [9] .....	32
OBR. 27 BLOKOVÉ SCHÉMA FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU S VÝROBOU VODÍKU. ....	35
OBR. 28 FVE STAROJICKÁ LHOTA. [32] .....	36
OBR. 29 ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA PŘIPOJENÍ FVE. ....	38
OBR. 30 PRŮMĚRNÝ ROČNÍ ÚHRN GLOBÁLNÍHO ZÁŘENÍ V MORAVSKOSLEZSKÉM KRAJI. ....	38
OBR. 31 KŘIVKY ČINNÉHO VÝKONU ZA 24 HODIN PRO JEDEN ROK. ....	39
OBR. 32 KOEFICIENT VYUŽITÍ. ....	41
OBR. 33 ČETNOST VÝKONŮ. ....	41
OBR. 34 TÝDENNÍ PRŮMĚRNÉ KŘIVKY DENNÍHO VÝKONU FVE PRO MĚSÍC KVĚTEN. ....	42
OBR. 35 DENNÍ NÁRŮST ČINNÉHO VÝKONU PRO VYBRANÉ DNY MĚSÍCE KVĚTNA. ....	43
OBR. 36 TÝDENNÍ PRŮMĚRNÉ KŘIVKY DENNÍHO ČINNÉHO VÝKONU FVE PRO MĚSÍC ZÁŘÍ. ....	43
OBR. 37 DENNÍ NÁRŮST VÝKONU PRO VYBRANÉ DNY MĚSÍCE ZÁŘÍ. ....	44
OBR. 38 TÝDENNÍ PRŮMĚRNÉ KŘIVKY DENNÍHO VÝKONU FVE PRO MĚSÍC PROSINEC. ....	44
OBR. 39 DENNÍ NÁRŮST VÝKONU PRO VYBRANÉ DNY MĚSÍCE PROSINEC. ....	45
OBR. 40 DENNÍ KOEFICIENT VYUŽITÍ PRO METEOROLOGICKY VÝHODNÉ MĚSÍCE. ....	46
OBR. 41 DENNÍ KOEFICIENT VYUŽITÍ PRO METEOROLOGICKY NEVÝHODNÉ MĚSÍCE. ....	46
OBR. 42 HISTOGRAM ČETNOSTI DODÁVANÉHO VÝKONU JARO. ....	47
OBR. 43 HISTOGRAM ČETNOSTI DODÁVANÉHO VÝKONU LÉTO .....	47

OBR. 44 HISTOGRAM ČETNOSTI DODÁVANÉHO VÝKONU PODZIM. ....	48
OBR. 45 HISTOGRAM ČETNOSTI DODÁVANÉHO VÝKONU ZIMA. ....	48
OBR. 46 KOLÍSÁNÍ ČINNÉHO JALOVÉHO VÝKONU V KVĚTNU 2011. ....	49
OBR. 47 PQ KOLÍSÁNÍ ČINNÉHO A JALOVÉHO VÝKONU V ZÁŘÍ 2010.....	49
OBR. 48 KOLÍSÁNÍ ČINNÉHO A JALOVÉHO VÝKONU V PROSINCI 2010.....	50
OBR. 49 VÝKON FVE 8.5.2011.....	51
OBR. 50 VÝKON FVE 4.5.2011.....	52
OBR. 51 VÝKON FVE 13.5.2011.....	52
OBR. 52 SROVNÁNÍ VÝKONŮ NA ROZVODNĚ S PŘÍSPĚVKY FVE VE SLEDOVANÉM OBDOBÍ. ....	53
OBR. 53 SROVNÁNÍ VÝKONŮ NA ROZVODNĚ S PŘÍSPĚVKY FVE 30. 7. 2010. ....	54
OBR. 54 SROVNÁNÍ VÝKONŮ NA ROZVODNĚ S PŘÍSPĚVKY FVE 6. 8. 2011. ....	54
OBR. 55 SROVNÁNÍ VÝKONŮ NA ROZVODNĚ S PŘÍSPĚVKY FVE V POLEDNÍCH HODINÁCH DNE 8. 8. 2011. ....	55
OBR. 56 SROVNÁNÍ VÝKONŮ NA ROZVODNĚ S PŘÍSPĚVKY FVE V POLEDNÍCH HODINÁCH DNE 4. 8. 2011. ....	55
OBR. 57 VÝKON DODÁVANÝ Z NADŘAZENÉ SOUSTAVY.....	56
OBR. 58 HISTOGRAM ČETNOSTI DODÁVANÉHO VÝKONU Z NADŘAZENÉ SOUSTAVY. ....	57
OBR. 59 ZÁPORNÁ ČÁST ČETNOSTI DODÁVANÉHO VÝKONU Z NADŘAZENÉ SOUSTAVY. ....	57
OBR. 60 SROVNÁNÍ JALOVÝCH VÝKONŮ NA ROZVODNĚ S PŘÍSPĚVKY FVE. ....	58
OBR. 61 DDZ ROZVODNY A FVE.....	59
OBR. 62 PROCENTUÁLNÍ ZMĚNA VÝKONU ELEKTRÁRNY. ....	60
OBR. 63 POČET VÝSKYTU ZMĚN VÝKONU ELEKTRÁRNY. ....	60
OBR. 64 ZMĚNA VÝKONU V JEDNOTLIVÝCH LETNÍCH MĚSÍCÍCH. ....	61
OBR. 65 ZMĚNA VÝKONU V JEDNOTLIVÝCH ZIMNÍCH MĚSÍCÍCH. ....	61
OBR. 66 NÁRŮST VÝKONU FVE VE VYBRANÝCH MĚSÍCÍCH.....	62
OBR. 67 KOEFICIENT VYUŽITÍ VE VYBRANÝCH MĚSÍCÍCH. ....	62
OBR. 68 HISTOGRAM ČETNOSTI DODÁVANÉHO VÝKONU. ....	63

## **Seznam tabulek**

TAB. 1 PŘECHOD FRONTÁLNÍ OBLAČNOSTI PŘES ÚZEMÍ ČR.....	31
TAB. 2 TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH PANELŮ .....	36
TAB. 3 ELEKTRICKÉ PARAMETRY STŘÍDAČE. ....	37
TAB. 4 ROČNÍ VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE Z FVE STAROČESKÁ LHOTA .....	40

## **Použitá literatura**

- [1] HRADÍLEK, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení, VŠB-TU, Ostrava: MONTANEX, 2008, ISBN 978-80-7225-291-6.
- [2] HRADÍLEK, Z., ŠUMBERA T.: Stochastic production of photovoltaic power plant., Prognozowanie w elektroenergetyce PE 2011. Polsko, Wisla 2011.
- [3] PROKOP, L., MIŠÁK, S.: Hodnocení provozu fotovoltaické elektrárny, EPE2011, Kouty nad Desnou 2011.
- [4] MASTNÝ, P., DRÁPELA, J., MIŠÁK, S., MACHÁČEK, J., PTÁČEK, M., RADIL, L., BARTOŠÍK, T., PAVELKA T.: Obnovitelné zdroje elektrické energie, ČVUT, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04937-2.
- [5] VRTEK, M.: Renewable sources in Energy Systéms, VŠB-TU, Tarnow:TAN Publisher, 2009, ISBN 978-83928990-0-6.
- [6] RYCHETNÍK, V., JANOUŠEK, J., PAVELKA, J.: Větrné motory a elektrárny, ČVUT, Praha 1997, ISBN 80-01-01563-7.
- [7] HRADÍLEK, Z., MIŠÁK, S., PROKOP, L., ŠUMBERA, T.: Posouzení vlivu růstu dodávky elektrické energie z fotovoltaických zdrojů na DS, Ostrava, 2010, HS 410002.
- [8] HRADÍLEK, Z., MIŠÁK, S., PROKOP, L., ŠUMBERA, T.: Stanovení soudobosti na vytípaných zdrojích FVE v zadaných oblastech, Ostrava, 2011.
- [9] Šumbera, T., Střída, F., Hradílek, Z., Rusek, S.: Evaluation of cooperation WPP and PV connected through the shared transformer to the network 22kV. Advances in Electrical and Electronic Engineering, Vol 10, No 1 (2012). ISSN 1336-1376 (Print), ISSN 1804-3119 (Online), MK CR E 20146.
- [10] ČESKÉ SDRUŽENÍ REGULOVANÝCH ELEKTROENERGETICKÝCH SPOLEČNOSTÍ, [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: <<http://www.csres.cz/Aktualne/Aktualne.htm>>
- [11] ČEPS, a.s., [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: <<http://www.ceps.cz/CZE/Stranky/default.aspx>>.
- [12] HAJDÚ, L.: Vliv decentralizovaných zdrojů na provozování distribuční soustavy 110 kV E.ON: diplomová práce, Brno: VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011, 70 l, 21 l. pril. Vedoucí diplomové práce: Jaroslava Orságová.
- [13] NIESLANIK, T.: Analýza kvality napětí z obnovitelných zdrojů: bakalářská práce, Ostrava: VŠB, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2010, 44 l. Vedoucí bakalářské práce: Lukáš Prokop.
- [14] SOLARENVI, [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: <<http://www.solarenci.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/off-grid/>>.
- [15] Školská fyzika, KOF ZCU, Plzeň 2002, [online], [cit. 2010-04-01], 4x ročně, Dostupné z WWW: <<http://sf.zcu.cz/rocnik07/cislomm/1-7def.html>>, ISSN 1211-151.
- [16] Řízení frekvence - bilance činných výkonů v ES, [online], [cit. 2012-04-01] Dostupné z WW:<[http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/res/Prednaska\\_Rizeni\\_frekvence3\\_Maslo.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/res/Prednaska_Rizeni_frekvence3_Maslo.pdf)>
- [17] PilsFree, [online], [cit. 2012-04-01], Regulace frekvence v elektrizační soustavě, Dostupné z WWW: <[http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/\\_pred\\_web/5\\_MRRegulaceES.pdf](http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/_pred_web/5_MRRegulaceES.pdf)>.
- [18] 4-CONSTRUCTION, [online], [cit. 2012-04-01], Akumulace elektrické energie, Dostupné z WWW:<<http://www.4-construction.com/cz/clanek/akumulace-elektricke-energie/>>.

- MPO Efekt, [online], [cit. 2012-04-01], Sborník technicko-ekonomických postupů vedoucích k vytvoření dispečersky řízeného systému kogeneračních zdrojů, Dostupné z WWW:< [http://www.mpo-efekt.cz/dokument/99\\_8145.pdf](http://www.mpo-efekt.cz/dokument/99_8145.pdf)>.
- [20] Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps, [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: < <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>>.
- [21] Dobré světlo, [online], [cit. 2012-04-01], Sluneční kalkulátor, Dostupné z WWW:< [http://www.dobre-svetlo.com/tools\\_sun.php](http://www.dobre-svetlo.com/tools_sun.php)>.
- [22] Kodex přenosové soustavy, [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: <[http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Documents/2012/%C4%8C%C3%A1stI\\_12\\_fin01.pdf](http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Documents/2012/%C4%8C%C3%A1stI_12_fin01.pdf)>.
- [23] European Photovoltaic Industry Association, [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: <<http://www.epia.org/publications/epiapublications.html>>.
- [24] Isofen Energy dodavatel fotovoltaických systémů, [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: < <http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>>.
- [25] Czech RE Agency, [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: < <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>>.
- [26] Protection Consulting, [online], [cit. 2012-04-01], dostupné z WWW: <<http://www.protection.cz/stano-visko-protection--consulting-sro-k-stop-stavu-v-ceske-republice.html?id=21&lid=1038>>.
- [27] Isofen Energy dodavatel fotovoltaických systémů, [online], [cit. 2012-04-01] Dostupné z WWW: < <http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>>.
- [28] CZEPHO, [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: <<http://czepho.cz/cs>>.
- [29] Wattsun – fotovoltaika, fotovoltaické panely, [online], [cit. 2012-04-01] Dostupné z WWW:< <http://www.wattsun.cz/fotovoltaicke-panely.php>>.
- [30] SUNTECH, [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW:< [http://www.suntech-power.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=182&Itemid=186&lang=en](http://www.suntech-power.com/index.php?option=com_content&view=article&id=182&Itemid=186&lang=en)>
- [31] Fotovoltaika aneb získávání elektřiny ze slunce, [online], [cit. 2012-04-01] Dostupné z WWW:< <http://fotovoltaika.falconis.cz/fotovoltaika/fotovoltaicky-panel.php>>.
- [32] REN Power CZ, [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: <<http://www.renpower.cz/lhota.html>>.
- [33] Renewable Energy Sources, [online], [cit. 2012-04-01], Dostupné z WWW: <<http://www.renewable-energy-sources.com/2009/10/30/solar-radiation-maps-and-photovoltaic-electricity-potential-for-european-countries/>>